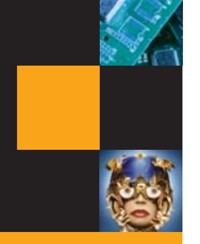
ENERO 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



GENETICA
Del genotipo al fenotipo

PSICOLOGIA
Evolución de la mente

PALEONTOLOGIA
Arbol genealógico de *Homo sapiens*

SELECCION NATURAL
¿Opera sobre genes, individuos o grupos?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS



Actualidad y alcance de la teoría de Darwin

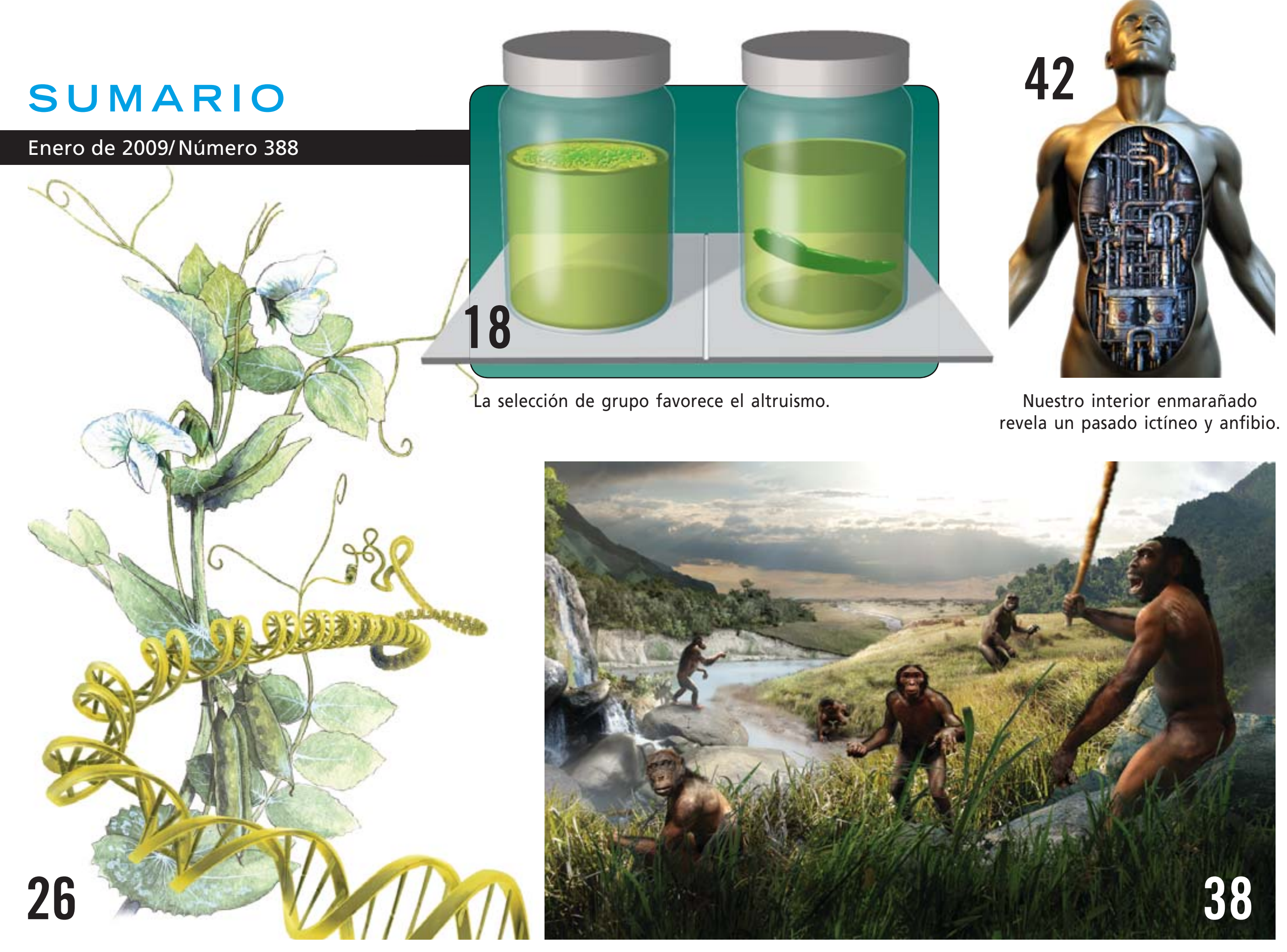
ORIGIN OF SPECIES
Darwin

each must exist—it is
natural selection, of s
the individual, that gi
modifications of struc



SUMARIO

Enero de 2009/ Número 388



La selección de grupo favorece el altruismo.

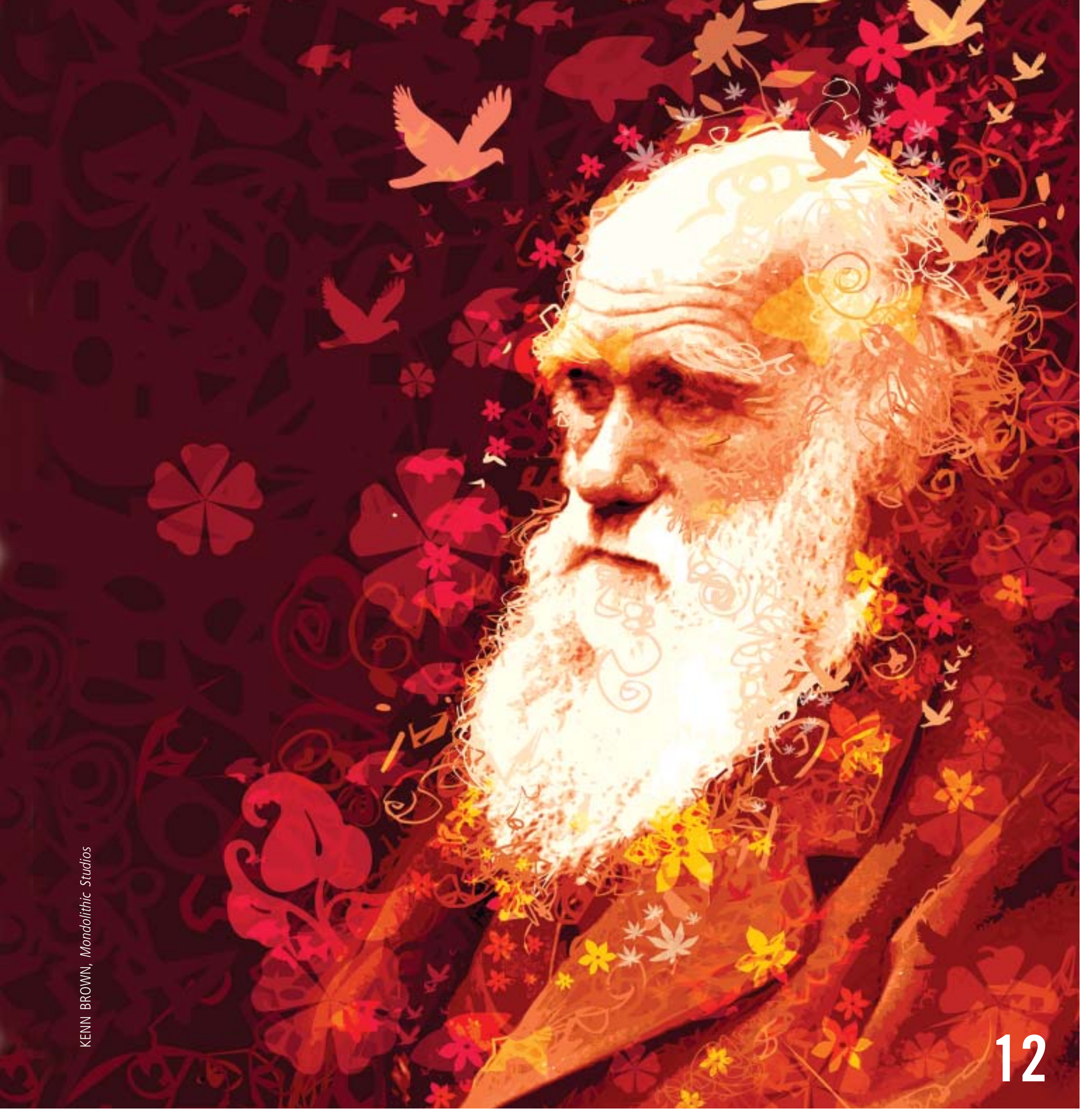
Nuestro interior enmarañado revela un pasado ictíneo y anfibio.

Darwin no podía explicar el origen de las variaciones entre los individuos.

Hoy se conocen numerosos fósiles de diferentes especies humanas; Darwin sólo conocía los neandertales.

ARTICULOS

EN PORTADA:
TIME LIFE PICTURES/GETTY IMAGES (*Charles Darwin*); KENN BROWN *Mondolithic Studios* (*mujer robot*); TAMI TOLPA (*VIH*); TAYLOR S. KENNEDY *National Geographic* (*chips de ordenador*); © MEDICALRF.COM/CORBIS (*glóbulos rojos y superficie de célula azul*); ALBERT J. COPLEY (*ammonites*); KEN EWARD (*ADN*); © DLILLC/CORBIS (*ojo de chimpancé*); ROBIN MACDOUGALL (*guisantes*); SCIENCE SOURCE (*pinzones*)



Se celebra el sesquicentenario de la publicación de *El origen de las especies*, obra magna de Charles Darwin.

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser, Christine Soares y Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
MANAGING EDITOR, ONLINE Ivan Oransky
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin House

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

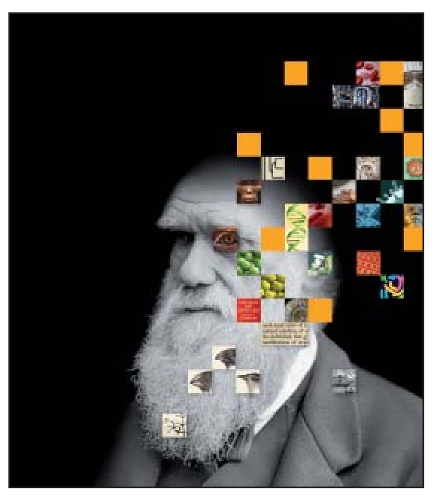
Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Valle del silencio, 28 4.º J
28039 Madrid
Tel. 915 759 278 – Fax 918 276 474
Móvil 649 933 834

Cataluña:
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 934 143 344
Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Xavier Roqué: *El legado de Darwin*; Maite Garazi Barrón Aduriz: *Genética de la selección natural*; Joandomènec Ros: *Del átomo al carácter*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Carlos Lorenzo: *El linaje humano*; Marián Beltrán: *Rasgos anatómicos del pasado*, *Cuatro falacias de la psicología evolutiva popular* y *Desarrollo sostenible*; Antonio Barbadilla: *Evolución "por el bien del grupo"*; Luis Bou: *La evolución en la vida cotidiana, Puesta al día* y *Juegos de ordenador*; Bruno Moreno: *Apuntes*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*



Portada: Jen Christiansen

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo S.L. (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Voces del proceso Scopes. «'Soy Clarence Darrow', dijo la voz al otro extremo del hilo, 'supongo que habrá leído los periódicos y sabrá, por tanto, que Bryan y su equipo van a procesar a ese chico, Scopes. Bueno, Malone, Colby y yo nos hemos metido en un buen lío al ofrecernos para la defensa. No sabemos mucho sobre evolución, ni a quién llamar de testigo. Aunque sí estamos convencidos de que vamos a librar la misma batalla que usted a favor de la libertad académica. Necesitamos ayuda de la universidad, por lo cual le ruego que tres de ustedes vengan a mi oficina para ayudarnos a preparar el caso.'

Aquella tarde tres de nosotros (Horatio Hackett Newman, profesor de biología, Shailer Mathews, decano de la facultad de teología, y yo) nos reunimos en la oficina de Darrow para trazar la estrategia del que resultó ser uno de los procesos judiciales más famosos del siglo.

—Fay-Cooper Cole»

[NOTA DE LA REDACCION: En 1925 Cole ejercía de antropólogo en Chicago.]

El núcleo atómico. «De hecho, en los últimos años el problema ha sido la abundancia de modelos (del núcleo), cada uno de los cuales explica satisfactoriamente el comportamiento de los núcleos en ciertas situaciones; cada uno, al parecer, en contradicción con otros modelos acertados en otros aspectos o con nuestras ideas sobre las fuerzas nucleares. De un tiempo a esta parte se ha avanzado bastante, puesto orden en esa maraña y justificado cada modelo dentro de su dominio potencial de aplicación. Surge así un cuadro general en el que los distintos y en apariencia contradictorios modelos del núcleo se ven como partes coherentes de un conjunto, adecuado cada uno para responder a ciertas preguntas sobre el comportamiento de los núcleos. —R. E. Peierls»

...cien años

¿Por qué los terremotos? «Con toda probabilidad, un terremoto es una de las consecuencias ineludibles del enfriamiento de la Tierra. A medida que va disminuyendo el calor del planeta de forma gradual al ser irradiado al espacio, la masa de la Tierra debe irse contrayendo, también de forma gradual. La corteza terrestre tiene, pues, que acomodarse de tanto en tanto al hecho de que todo el globo se empequeñece lenta e inexorablemente. Incluso un leve desplazamiento de una superficie extensa sobre otra estaría acompañado de una violencia muchísimo mayor que la que podríamos esperar dada la pequeñez del movimiento, con el resultado de una destrucción total de casas, pueblos e incluso grandes ciudades, con la consiguiente e insólitamente elevada pérdida de vidas humanas.»



EN EL NUMERO DEL AUTOMOVIL del 16 de enero de 1909 la contraportada exhibía este elegante y vistoso anuncio a toda página de Automóviles Pierce Arrow. La empresa, famosa por sus vehículos de lujo, cerró en 1938.

Madera para el caballo de hierro. «Tal gravedad está adquiriendo el problema del suministro de traviesas para nuestros ferrocarriles, que la compañía Santa Fe envió, en fecha reciente, de viaje por Oriente y Europa a su responsable de maderas y traviesas, para estudiar la situación. Se supo así, entre otras cosas, que hace trescientos años el gobierno japonés empezó a conservar sus bosques; y que, como consecuencia de su previsión, Japón vende ahora traviesas a los ferrocarriles de este país y de México. Que debamos pagar unos derechos de aduana del veinte por ciento por la importación de traviesas constituye una prueba más de las que se acumulan contra el irreflexivo despilfarro con el que nuestras reservas de madera han sido despiadadamente esquilmadas.»

...ciento cincuenta años

La utilidad de los cometas. «La cuestión de la utilidad de los cometas ha ocupado siempre un lugar destacado. S. W. Fullom, famoso autor de algunos libros de lectura agradable, sugiere una función para los cometas en su 'Maravillas de la Ciencia': Descartes, Euler y muchos otros creían que hay un medio sutil que inunda todo el espacio, al que llamaron 'éter' y que forma el océano por donde navegan los planetas y las estrellas fijas. En ese medio, los cometas actúan como barrenderos que impiden las acumulaciones de éter, manteniéndolo en un estado adecuado y constante de tenuidad tal, que las fuerzas de la naturaleza (gravedad, electricidad y luz) actúan con regularidad y precisión.»

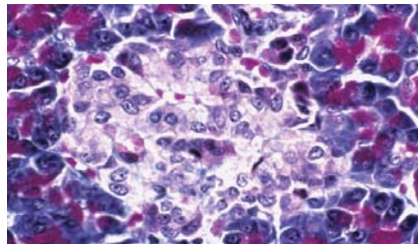
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 3, N.º 3; ENERO 1909

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Objetivo: Células T descarriadas

En la diabetes de tipo I, células T renegadas, pertenecientes al sistema inmunitario, asesinan a células beta pancreáticas, productoras de insulina. En teoría, la diabetes podría ser remediada mediante células beta nuevas. Pero como las células T autorreactivas y descarriadas acabarían por destruirlas también, resulta esencial detener el ataque de estas células insubordinadas. Hace algunos años, Denise L. Faustman, de la facultad de medicina de Harvard, demostró en ratones que la activación de un compuesto natural del organismo, el factor de necrosis tumoral (FNT), eliminaba de forma selectiva las células T autorreactivas y permitía la función de las células beta restauradas. El mismo proceso podría darse en humanos, como Faustman y sus colaboradores exponen en un artículo publicado vía Internet el 28 de agosto de 2008 en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. En marzo de 2008 dio comienzo un ensayo clínico de 18 meses de duración, en el cual se administra a pacientes un fármaco genérico para la tuberculosis que estimula la producción de FNT.



La diabetes de tipo I es consecuencia de la muerte de las células beta pancreáticas (*violeta en zonas blancas*).

Hierbas productoras de metano

Que las plantas emitieran metano fue causa de asombro para los investigadores y de encendidas controversias sobre la función de los bosques en el calentamiento planetario [*véase* "Metano, plantas y cambio climático"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2007]. No faltaron quienes dudaron de que en el mundo real tuvieran relevancia esos descubrimientos de laboratorio; pero se ha demostrado ahora que ciertas plantas liberan metano en su ambiente natural. Valiéndose de grandes cámaras de plástico para capturar emisiones de gases, un equipo chino ha encontrado que ciertas herbáceas del altiplano tibetano producen metano. Hallaron también que ciertos arbustos del prado alpino absorbían metano atmosférico, observación que no encaja con datos de laboratorio que indican lo contrario para las especies de arbustos de las tierras bajas. El director del estudio, Xinquan Zao, del Instituto de Biología de la Meseta Noroeste, con sede en Xining, afirma que esas discrepancias resaltan la necesidad de examinar individualmente cada especie, porque los vegetales difieren en su metabolismo y composición química, lo que afecta a su producción de gas de invernadero. El estudio se publicó en la versión en la red de *Biology Letters* el 26 de agosto de 2008.

—*Barbara Juncosa*



Electrogeneradores víricos

El autoensamblado constituye una estrategia básica en nanotécnica; ciertos virus genéticamente modificados, como los utilizados por Angela M. Belcher, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, resultan a tal fin de gran ayuda. El grupo de Belcher ha demostrado que una técnica de construcción basada en virus crea los electrodos de una microscópica batería eléctrica. Se obtuvieron por corrosión selectiva unos postes de micrómetros de diámetro en un sustrato de goma; se depositaron sobre ellos capas de polímero, que operan a modo de electrolito sólido. Depositaron sobre el electrolito un virus modificado, con el fin de producir un recubrimiento proteínico especial, que recoge moléculas de óxido de cobalto. El virus elabora el óxido de cobalto y crea una estructura que actúa como el electrodo negativo de una batería en descarga. Aunque todavía está por fabricar el electrodo positivo, la batería parcial (descrita en un estudio publicado en la Red el 27 de agosto de 2008 por *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*) exhibía plena funcionalidad electroquímica. Estas microbaterías podrían alimentar "laboratorios en un chip", dispositivos médicos implantables u otros equipos técnicos diminutos.

Adelgazar con grasa marrón

Los estudios sobre la obesidad ambicionan revelar las sendas bioquímicas creadoras de lipocitos [*véase* "¿Por qué engordamos?"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2007]. Puede que el secreto para perder peso sea tener más grasa... a condición de que ésta sea marrón. A diferencia de la grasa blanca, responsable de los "michelines" de la cintura y de las "pistoleras" en las caderas, la adiposidad marrón libera energía y promueve el consumo de calorías. En los humanos, casi toda la grasa marrón desaparece al poco del nacimiento, tras haber cumplido su función de mantener estable la temperatura corporal del neonato. En dos estudios publicados en *Nature* de 21 de agosto de 2008 se exponen formas de retrotraer lo marrón. Concretamente, se describen en ellos proteínas que controlan la creación de lipocitos marrones a partir de músculo inmaduro y de lipocitos blancos. Ratones a los que les fue administrada una de las proteínas desarrollaron más grasa marrón y se volvieron más esbeltos que los ratones que no la recibieron. Es concebible que una variante farmacológica pueda poner en marcha una conversión de lipocitos blancos en lipocitos marrones. Otra posibilidad consistiría en trasplantar células marrones al abdomen de una persona obesa, para que acelerasen el consumo calórico.

—*Nikhil Swaminathan*

CNRI/SPL/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*células beta*); KAZUYOSHI NOMACHI *Corbis* (*prados tibetanos*); TIM PLATT *Getty Images* (*hombre*)

EXTREMOFILOS

El espacio les sienta bien

Los seres humanos pueden sobrevivir sin protección en el espacio varios minutos, hasta que el aire de los pulmones se expande, los gases escapan de la sangre en forma de burbujas y la saliva hierve. En cambio, un pequeño animal que no pasa de 1,5 milímetros de longitud puede sobrevivir durante días en un entorno tan hostil. Los tardígrados están extendidos por todo el mundo, desde los sedimentos en el fondo oceánico hasta los líquenes en lo alto de las montañas. Gracias a que se han adaptado a la deshidratación, algunos tardígrados resisten hasta diez años en un medio sin humedad. Unos especímenes que fueron puestos en órbita el año pasado soportaron durante diez días el vacío del espacio. Sólo al encontrar radiación tuvieron que capitular; aun así, sobrevivió el 10 por ciento.

Los “tardígrados” pueden sobrevivir en el vacío del espacio exterior durante varios días.

Al igual que la bacteria *Deinococcus radiodurans*, los tardígrados supervivientes deben de disponer de algún mecanismo que repare los daños celulares. Los investigadores que estudiaron estos viajeros espaciales suponen que otras criaturas adaptadas para sobrevivir en condiciones de extrema sequedad, como los rotíferos, los nemátodos y las artemias, podrían disfrutar también de la capacidad que tienen los tardígrados de soportar las condiciones ambientales del espacio.

—David Biello

DROGODEPENDENCIA

La butirilcolinesterasa y la cocaína

Una versión mejorada de la proteína corporal que elimina la cocaína podría llevarnos hasta el primer medicamento eficaz para combatir las sobredosis y la adicción. El cuerpo puede descomponer y desactivar la cocaína mediante la butirilcolinesterasa, una proteína natural de la sangre, pero esta enzima es demasiado débil e ineficaz para su administración en clínica. Ahora, con la ayuda de simulaciones informáticas que realizan ensayos virtuales con las moléculas, se ha desarrollado una forma mucho más activa de la proteína.

Se estabilizaron sus estructuras reactivas y se las despojó de las partes que constituían una rémora para su función. En el laboratorio se ha visto que la forma mutante de la enzima degrada la cocaína unas 2000 veces más rápido que la versión natural. También se ha visto que la enzima artificial evitaba las convulsiones y la muerte de ratones que habían recibido dosis letales de cocaína.

—Charles Q. Choi

MATEMATICAS

Nuevos supernúmeros primos

La Gran Búsqueda en Internet de los Números Primos de Mersenne (GIMPS, según sus siglas en inglés) es la que está efectuando un grupo de voluntarios con sus ordenadores, mediante cálculo distribuido (es decir, repartido entre esos ordenadores). Un número primo de Mersenne es un número primo igual a restar uno de dos elevado a otro número. La Gran Búsqueda ha anunciado el descubrimiento de los dos mayores números primos, de Mersenne o no, obtenidos hasta ahora (y el cuadragésimo quinto y cuadragésimo sexto conocidos de Mersenne, del tamaño que sea). El número desplazado ahora de esa categoría también fue descubierto por GIMPS. El mayor de los dos nuevos primos de Mersenne es $2^{43.112.609} - 1$. Tiene casi 13 millones de dígitos y lo encontró la máquina de Edson Smith, de la Universidad de California en Los Angeles. GIMPS va a reclamar el premio de 100.000 dólares ofrecido por la *Electronic Frontier Foundation* para quien encontrase el primer número primo con más de 10 millones de dígitos. El menor de los nuevos números primos, encontrado por un miembro alemán de GIMPS, con 11,2 millones de dígitos, también podría haber ganado el premio, pero apareció dos semanas después.

—John Matson

ATMOSFERA

Respirando fuego

El aire debe contener al menos un 12 por ciento de oxígeno para que un objeto pueda quemarse. Eso se creía hasta ahora. Sin embargo, nuevos experimentos de combustión de madera de pino, musgo, papel, cerillas y una vela han convencido a los científicos del Colegio Universitario de Dublín de que el fuego necesita al menos un 15 por ciento de oxígeno (el aire contiene habitualmente en torno a un 21 por ciento). Se ha querido explicar algunas extinciones masivas a lo largo de la historia de la Tierra por medio de unos niveles reducidos de oxígeno en la atmósfera, unidos a incendios de los que el carbón vegetal sirve como prueba. Los nuevos hallazgos, según los cuales los niveles de oxígeno no pudieron ser tan bajos en algunas eras como se venía admitiendo, podrían contribuir a que se perfeccionen los modelos de la atmósfera primitiva.



—Charles Q. Choi

BOB GOLDSTEIN *Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill (tardígrado)*; JOHN ROSS *Getty Images (papel ardiendo)*

DATOS

Duele, pero divierte

En el primer estudio de este tipo realizado en el mundo, un grupo de investigadores de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades ha calculado cuántas urgencias hospitalarias están asociadas a las actividades recreativas al aire libre. Como era de esperar, los adolescentes son los que más a menudo se hacen daño. Brazos y piernas se llevan la peor parte.

LESIONES ANUALES ESTIMADAS: 12.708

NUMERO DE LESIONADOS POR CADA 100.000 PERSONAS, SEGUN SU SEXO:	
Hombres:	99,9
Mujeres:	45,1

NUMERO DE LESIONADOS POR CADA 100.000 PERSONAS, SEGUN SU EDAD:	
0 a 9 años:	31,9
10 a 14 años:	187,1
15 a 19 años:	214
20 a 24 años:	121,1

NUMERO DE LESIONADOS POR CADA 100.000 PERSONAS, SEGUN LA ACTIVIDAD:	
Deslizamiento por la nieve:	18,3
Trineos:	7,7
Excursionismo:	4,6

NUMERO DE LESIONADOS POR CADA 100.000 PERSONAS, SEGUN EL LUGAR DE LA LESION:	
Pierna:	19,4
Brazo:	18
Cabeza/cuello:	16,8
Tronco superior:	12

FUENTE: Wilderness and Environmental Medicine, *junio de 2008*

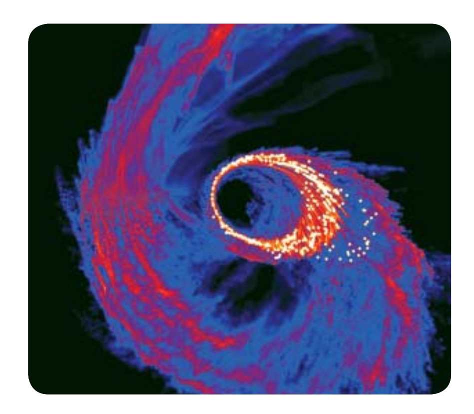


ASTROFISICA

Estrellas en la vecindad de los agujeros negros

Quizá se sepa ahora cómo se formó el grupo de unas cien estrellas que rodean el supermasivo agujero negro central de la Vía Láctea. Las estrellas nacen de nubes de moléculas de hidrógeno que se agrupan por su propia atracción gravitatoria colectiva. Sin embargo, la gravedad que un agujero negro supermasivo crea en su entorno debería haber esparcido violentamente las nubes, antes de que tuviesen la oportunidad de formar estrellas.

Se ha simulado el comportamiento de una nube de hidrógeno con una masa de 10.000 soles que se encontrase repentinamente en las cercanías de un agujero negro. Aunque una gran parte de la nube saldría despedida a la manera de salpicaduras de una batidora sin tapa, las ondas de choque y otras turbulencias extraerían momento angular del 10 por ciento interior. Ese material interno orbitaría entonces en torno al agujero negro, disponiendo así del tiempo necesario para la generación de estrellas. —*J. R. Minkel*



Hasta en una nube de hidrógeno (*violeta*) que se encuentre en torno a un agujero negro, pueden formarse estrellas allí donde se contraigan gravitatoriamente y cuya densidad aumente (*rojas* y *amarillas*).

NEUROLOGIA

El hockey es bueno para la cabeza

Los deportes pueden ejercitar no sólo el cuerpo, sino también la mente, en lo que se refiere a la comprensión del lenguaje. Para observar los efectos que produce sobre el cerebro la práctica de un ejercicio físico, se ha examinado con resonancia magnética funcional a 12 jugadores de hockey sobre hielo, a ocho aficionados a ese deporte y a nueve voluntarios que nunca habían presenciado un partido de hockey. Como era de esperar, los jugadores y aficionados de hockey comprendían mucho mejor que los novatos la jerga de ese deporte. Sin embargo, los investigadores de la Universidad de Chicago descubrieron también que, en los jugadores y en los aficionados, algunas partes del cerebro utilizadas por norma para la planificación y el control de acciones físicas se aplicaban para ayudar a comprender el lenguaje. De ello infieren que el cerebro podría ser más flexible en la edad adulta de lo que se pensaba anteriormente.

—*Charles Q. Choi*



MATT COLLINS (*ilustraciones*); CORTESIA DE *SCIENCE*/AAAS (*nube de hidrógeno en agujero negro*); CHRISTOPHER PASATIERI *Getty Images* (*jugadores de hockey*)

Evolución en movimiento

Frente al inevitable cambio ambiental del planeta, entender los procesos evolutivos que afectan a la dispersión y reciben el influjo de ésta permite prevenir la desaparición de especies amenazadas y controlar las especies invasoras

El mundo está repleto de especies que parecen distribuirse de un modo caprichoso. Algunos organismos omnipresentes se han adaptado a todo tipo de ambientes, pero la mayoría se limitan a determinadas áreas y muchos de ellos, endémicos, ocupan sólo escasos kilómetros cuadrados. Detrás de esta biodiversidad geográfica se esconde una historia de movimientos geológicos, cambios ambientales, migraciones y adaptación de poblaciones a su entorno.

Durante los últimos dos millones de años, múltiples glaciaciones dejaron el norte de Europa bajo hielo y trajeron a la península Ibérica poblaciones de animales típicamente norteños, como el oso o el lobo. En períodos más cálidos, una parte de estas poblaciones repoblaron Europa; otra se adaptó a las nuevas condiciones cálidas del sur favoreciendo a los individuos de menor tamaño que hoy caracterizan las poblaciones ibéricas.

Los ejemplos mencionados y otros que podrían aducirse sugieren quizá que la evolución y los cambios de distribución de las especies son procesos extremadamente lentos, perdidos en la historia. La realidad es muy distinta. Sin necesidad de meteoritos, glaciaciones o derivas continentales, los humanos somos hoy la mayor causa de cambio ambiental. Y de nuevo, las poblaciones de animales y vegetales se enfrentan a su eterno problema: adaptarse, dispersarse o morir.

No son pocos los ejemplos de especies cuya distribución ha cambiado en los últimos años a causa de la actividad humana. Por citar algunos: poblaciones menguantes tras la destrucción de su hábitat, organismos invasores accidentalmente propagados en nuestros viajes, aves desplazadas hacia el norte, donde las temperaturas han aumentado y márgenes de bosques modificados por los nuevos patrones de temperatura y precipitación. Ya sea por nuestro interés en preservar las especies amenazadas o por la necesidad de controlar las invasoras, los científicos necesitamos predecir los cambios operados.

La mayoría de los modelos predictivos tienen en cuenta los cambios en la disponibilidad del hábitat de la especie y la capacidad dispersora de sus individuos para pronosticar su futura distribución en el mapa. Lo que ignoran estos modelos es que las poblaciones, desplazadas o no, deben adaptarse a las nuevas condiciones ambientales. Bellos ejemplos de evolución contemporánea han desterrado la idea de que la evolución es un proceso lento, imperceptible a escala humana. Mi ejemplo favorito es el del *guppy*, un pececillo de los ríos de la isla de Trinidad y de otros lugares del Caribe, tal y como los estudió en 1980 John Endler, por entonces en la Universidad de Princeton y hoy en la de Exeter.

Se trasladó una pequeña población de esos peces desde una zona llena de depredadores hacia otra sin depredadores. En apenas dos años, la nueva población, cuyos machos solían lucir colores discretos, pasó a estar dominada por machos de vivos colores. Los machos más vistosos, que antes eran presa fácil y apenas sobrevivían para reproducirse, podían ahora aprovechar su mayor atractivo sexual y esparcir sus genes en pocas generaciones. El descubrimiento de casos como éste han revolucionado el estudio de la biología evolutiva, que ha pasado de ser etiquetada como pseudociencia histórica a ser comparable a la química y la física en su capacidad de elaborar predicciones contrastables en tiempo real.

Los preocupantes cambios ambientales representan una oportunidad ideal para poner a prueba y afianzar nuestro entendimiento de los procesos evolutivos. De nuevo, la dispersión desempeña una función esencial. Para que dos poblaciones de una misma especie en ambientes diferentes se adapten a sus respectivos entornos, debe haber cierto grado de aislamiento entre las dos. Si existe un flujo importante de individuos entre poblaciones, los genes favorecidos por la selección natural en la población autóctona serán diluidos por genes alóctonos adaptados a otros ambientes; la consecuencia es que la adaptación local se enlentece. Así pues, la dispersión se



Los *guppies*, peces del Caribe habituales de las peceras domésticas, ofrecen un ejemplo, con su rápida evolución hacia colores más vivos cuando no los acosaban depredadores, de que la evolución también actúa en tiempos breves en términos humanos.

CORTESIA DE PAUL BENTZEN, UNIVERSIDAD DE DALHOUSIE, CANADA

convierte en un arma de doble filo: permite la expansión de una especie al mismo tiempo que limita su capacidad de adaptación local. Entender el equilibrio entre dispersión y adaptación resulta esencial para predecir la invasión de nuevos territorios.

Por suerte o desgracia, la historia no acaba aquí. Tanto los modelos puramente ecológicos como los evolutivos se olvidan de algo clave: la capacidad dispersora no constituye una propiedad inmutable de una población. Como cualquier otro rasgo morfológico, fisiológico o de comportamiento, la dispersión se halla sometida a las mismas leyes de la selección natural; vale decir, evoluciona también.

Estudios recientes de mariposas —como los dirigidos por Ilkka Hanski, de la Universidad de Helsinki— y otros insectos han identificado genes que afectan a la capacidad dispersora de los individuos. Observaciones sobre la distribución de estos individuos en el espacio confirman una lógica aplastante: los individuos portadores del gen que favorecen la dispersión se concentran en las áreas de colonización más reciente. Las observaciones dirigidas por Richard Shine, de la Universidad de Gales del Sur, de la vertiginosa expansión en Australia del sapo gigante, introducido por los europeos, confirma el mismo patrón. Los individuos en el frente de expansión son, de nuevo, los dotados de mayor capacidad dispersora, que en este caso viene determinada por unas ancas más largas. Esto explica la acelerada invasión de la especie: los individuos en la avanzadilla son los más capacitados para seguir progresando. Pero todo tiene un límite, y parece que ha llegado un punto en que los individuos de patas demasiado largas sufren ni más ni menos que de una especie de lumbago batracio. El compromiso entre la capacidad de dispersión y el cumplimiento de otras funciones vitales determina la regulación de la onda invasora.

Pero no siempre son los individuos más vigorosos los que se dispersan. En especies de aves y mamíferos sociales, los dispersores son a menudo aquellos incapaces de competir con la población local. Al fin y al cabo, dispersarse es peligroso y los individuos dominantes, ante una sobrepoblación, se benefician más expulsando a otros individuos que dispersándose ellos mismos. En estos casos, nuevas áreas son colonizadas por individuos de menor calidad, que probablemente sobrevivirán y se reproducirán menos; así, se limitará la expansión de la especie.

Muchos ecólogos consideran el estudio evolutivo de la dispersión un ejercicio de interés puramente teórico. Con los ejemplos aducidos se pone en evidencia la necesidad de integrar la teoría evolutiva con nuestros esfuerzos aplicados de conservación frente al cambio global. Ciento cincuenta años después de la publicación de la teoría de la evolución, nos enfrentamos al mayor de sus retos. Más allá de demostrar su validez para explicar el origen de las especies, su verdadera prueba de fuego estribará en que demuestre su capacidad de predecir y gestionar el futuro de la biodiversidad.

Andrés López-Sepulcre
Universidad de California

Vacas, cerdos, pollos y excrementos

Los excedentes de purines derivados de la ganadería intensiva constituyen un grave problema ambiental. Se postula un mayor control de usos e instalaciones, así como un endurecimiento de la legislación

Marvin Harris reflexionaba en su libro *Vacas, cerdos, guerras y brujas. Los enigmas de la cultura* sobre la importancia de cerdos y vacas en ciertas culturas. ¿Qué sería de España sin el jamón serrano? ¿Y de Alemania sin las salchichas de Frankfurt? Leche, quesos, filetes, huevos... son productos insustituibles en nuestra dieta. La creciente demanda de tales alimentos ha llevado a la concentración en complejos agropecuarios del ganado que los produce. Esa ganadería intensiva se aplica principalmente a cerdos, vacas y pollos. Genera residuos que, por su concentración, contaminan el suelo, el agua (superficial y subterránea) y la atmósfera, además de producir malos olores y modificar el paisaje.

Los residuos ganaderos difieren en composición, origen y textura. Así, hablamos de *lisier* (vacuno), estiércol sólido, líquido o gallinaza (aves). Los residuos que presentan mayor incidencia ambiental son los purines: mezcla de deyecciones porcinas, restos de paja, alimentos y agua.

En países europeos de gran implantación porcina como Alemania y Holanda, tales problemas ambientales motivaron la redacción de la Directiva 91/676/CE, que protege las aguas continentales de la contaminación por nitratos, provenientes, entre otras fuentes, de residuos ganaderos.

Características e impacto ambiental

Los purines contienen compuestos nitrogenados, materia orgánica, microorganismos patógenos, fósforo, potasio, sulfatos, metales pesados, antibióticos y desinfectantes. Diversos factores influyen en las características del residuo final: la dieta del ganado y la época del año afectan a la composición, el contenido de agua condiciona el tipo de almacenamiento y el tiempo de acumulación determina el poder fertilizante y la carga contaminante.

La contaminación asociada a los purines, de carácter orgánico y bacteriológico, procede del vertido de los mismos, así como de su aplicación a modo de abono. El daño ambiental se incrementa con la ausente o deficiente impermeabilización de las instalaciones y la aplicación continua de residuos sobre terrenos permeables, que favorecen la infiltración (sobre todo cuando se vierten en superficies reducidas grandes volúmenes de residuo). El poder contaminante de los purines estriba en el desequilibrio que provocan en el medio: se produce un incremento, en el agua y en el suelo, de la concentración de nitratos y de los elementos anteriormente citados, así como de microorganismos. Se desaconseja, por tanto, la

utilización directa de purines, sin tratamiento previo, máxime en áreas hidrogeológicamente vulnerables.

Gestión de residuos

Una gestión de los residuos correcta implica un almacenamiento adecuado y una reducción de la producción; depende de los tratamientos aplicados. Agréguese el interés del emplazamiento idóneo de la explotación ganadera, desde el punto de vista hidrogeológico. Las instalaciones no deben situarse sobre terrenos permeables ni en la zona no saturada de los acuíferos. Por ello, es preciso disponer de suficiente conocimiento geológico del subsuelo.

El almacenamiento de purines se realiza junto a los puntos de producción. Una mala práctica habitual consiste en liberar los residuos directamente sobre el suelo, sin tomar medidas de aislamiento. Además, en ocasiones se producen pérdidas en los sistemas de recogida y canalización. En España no existe una norma que regule las construcciones para el almacenamiento de purines. Estas deberían evitar la infiltración de residuos hacia las aguas subterráneas. Deberían impermeabilizarse con arcilla o materiales artificiales que garantizasen la estanqueidad, así como tener suficiente capacidad de almacenamiento para evitar desbordamientos. Pero no hay obligación legal de impermeabilizar balsas y fosas. La legislación española autoriza el vertido si un estudio hidrogeológico demuestra su inocuidad, aunque no especifica qué parámetros deben cumplirse para que un emplazamiento pueda considerarse adecuado (RDL 1/2001; RD 606/2003).

Se puede reducir la producción de residuos mediante el control del crecimiento de la cabaña y de la nutrición de los animales, la mejora de las instalaciones y la reducción del consumo de líquidos y sólidos.



Fosa llena de purines de cerdo en una explotación ganadera murciana.

MARC MARTINEZ

Los tratamientos de los residuos pueden ser fisicoquímicos o biológicos. Entre los primeros destaca el secado por evaporación o centrifugación. Los métodos biológicos emplean la flora microbiana de los purines junto a la fauna bacteriana para la degradación, reducción y asimilación de la carga contaminante. Destaca la digestión anaerobia, que genera biogás, una fuente de energía alternativa. En la actualidad existen en España 20 plantas de purines en funcionamiento y un número considerable de plantas proyectadas, concentradas en Cataluña, Aragón, Galicia y Murcia. Esas plantas resuelven el problema de los excedentes de purines en zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.

Existen también pretratamientos y postratamientos. En los primeros, se separa el sólido del líquido; se usan fluidificantes, para reducir los sólidos, y desodorizantes, que minimizan los malos olores. El lagunaje y el filtro verde se emplean en el postratamiento; contemplan el uso de microorganismos, plantas y árboles como los chopos, por su capacidad de transformar y asimilar contaminantes.

Códigos de buenas prácticas

Sin embargo, no basta con reducir la contaminación en los puntos de origen (las granjas), dado que la principal fuente de contaminación ambiental se debe a la utilización incorrecta de los purines en abono. Trabajos recientes del grupo que dirige Xavier Domene, del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales de la Universidad Autónoma de Barcelona, han demostrado que la sobrefertilización con abonos orgánicos puede resultar tóxica para los suelos.

Según la normativa europea elaborada para reducir y prevenir la contaminación por purines (Directiva 91/676/CEE y su trasposición a la normativa española a través del RD 261/96), así como para proteger la salud humana y los ecosistemas acuáticos, cada comunidad autónoma debe establecer un código de buenas prácticas agrarias, que los agricultores podrán poner en práctica de forma voluntaria. Sin embargo, las recomendaciones provenientes de dichos códigos difieren de una comunidad autónoma a otra.

Marc Martínez Parra
Instituto Geológico y Minero de España

Velar por el futuro

En vez de enfrentar el hoy con el mañana, concentrémonos en el capital público que legaremos al futuro

Jeffrey D. Sachs

Muchos de los problemas más acuciantes del planeta golpearán con más severidad en los próximos cincuenta o cien años. El cambio climático, que ya causa estragos locales en forma de sequías y oleadas de calor, en pocas décadas podría provocar catástrofes globales. Las altas temperaturas y los cambios en las pautas de las precipitaciones podrían recortar drásticamente la producción de alimentos y desencadenar hambrunas masivas en las zonas más necesitadas del mundo; cabe la posibilidad de que las grandes capas de hielo de Groenlandia y la Antártida se derrumben parcialmente, con lo que subiría varios metros el nivel del mar y se inundarían las costas.

En general, la prevención de estos desastres se ve como un enfrentamiento entre las generaciones actuales y las futuras: para asegurar el bienestar de las generaciones venideras, se nos aconseja que reduzcamos ahora el consumo, el uso de energía y otras actividades que agotan los recursos. Así, el conflicto se formula en términos éticos: ¿Qué le debe el presente al futuro? ¿Cuánto deberían apretarse el cinturón las generaciones actuales para favorecer a las venideras? Estas cuestiones son importantes, pero pasan por alto un aspecto crucial del problema.

Supongamos que aceptamos como un hecho los niveles de consumo existentes, establecidos por políticos cortos de miras que responden a un electorado alicorto. Aun así, nuestras decisiones sobre la inversión pública, que tienen consecuencias a largo plazo, pueden afectar al bienestar de futuras generaciones. Imaginemos que pudiésemos prevenir el futuro cambio climático por medio de un sistema energético más caro que costara un 1 por ciento adicional de los ingresos nacionales. El plan podría incluir, por ejemplo, el gasto en investigación, desarrollo y despliegue de técnicas de captación y almacenamiento de carbono en plantas de energía de combustión de carbón o los costes de una red eléctrica de energía solar a gran escala.

Las generaciones actuales no tienen por qué correr con estos gastos extra. En vez de eso, se pueden financiar con bonos del estado a largo plazo que saldarían las generaciones venideras. Sin cambiar nuestros niveles de consumo podemos elegir lo que legar al futuro: una red de energía baja en carbono y un clima estable, que costearán las generaciones futuras pagando una deuda pública algo más alta; o, por el contrario, una red eléctrica sucia, un cambio climático galopante y una menor deuda pública.



MATT COLLINS

En vez de preguntarnos si deberíamos sacrificarnos en aras del porvenir, podemos reflexionar sobre cómo legar una cantidad determinada de capital público al futuro. Naturalmente, las generaciones venideras preferirían que pagáramos nosotros por la preservación del medio apretándonos hoy el cinturón. Pero si no pudiera ser así, presumiblemente elegirían tener un clima más saludable y un sistema energético sostenible, aunque heredaran una deuda pública algo más alta.

Claro está, el problema de asignar el capital público de manera eficiente para el futuro no sólo ha de tener en cuenta el cambio climático. Podemos legar al futuro una mayor o menor biodiversidad (en vez de unas mejores infraestructuras de ejecución humana) o una más o menos numerosa población mundial (dependiendo de la inversión pública encaminada a apoyar las reducciones voluntarias de la natalidad por medio de la planificación familiar). Estas opciones no enfrentan el presente con el futuro; representan diferentes tipos de capital público dejado al futuro.

Nuestros sistemas políticos están diseñados principalmente para decidir sobre inversiones colectivas que afectan al presente. Está mal preparado para lidiar con problemas a largo plazo, incluso cuando se elaboran con miras a que una futura generación cargue con los costes de su propio bienestar. Ni los políticos de hoy ni la sociedad en general se encuentran preparados para tomar decisiones con cierta claridad.

Es necesario experimentar con nuevas formas de representar el futuro políticamente. Existen herramientas analíticas poderosas, como las "cuentas generacionales" desarrolladas por Laurence J. Kotlikoff, economista de la Universidad de Boston, para examinar el balance de capital público, natural y privado, que se transfiere a generaciones venideras; con estas herramientas es posible dilucidar las distintas formas en que podemos influir en su bienestar. Podemos proponer que políticos o expertos en ética actúen como "defensores del pueblo" en representación de las futuras generaciones en la mesa de negociaciones. Este tipo de ideas puede sonar descabellado, pero más lo sería un futuro acuciado por la desolación ambiental, al no haber pensado con claridad sobre las consecuencias de las decisiones que tomamos.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.



EL LEGADO DE DARWIN

Hace 150 años, un naturalista victoriano que había dedicado su vida a observar meticulosamente la naturaleza, ideó una teoría que sigue guiando la investigación científica contemporánea • • • **GARY STIX**

En 1835, cuando contaba 26 años, Charles Darwin avistó desde el *HSM Beagle* las islas Galápagos. Una vez en el archipiélago, no prestó demasiada atención al grupo de aves que hoy asociamos con su nombre. El naturalista no percibió ninguna diferencia entre las especies que poblaban las islas a las que arribó el barco; tomó por gorriones a algunos de los pájaros que hoy conocemos como pinzones de Darwin. A su regreso a Inglaterra, el artista y ornitólogo John Gould empezó a ilustrar los especímenes de pinzones de la bodega del *Beagle*. Darwin reconoció su error.

El joven naturalista autodidacta fue comprendiendo de forma paulatina que el tamaño del pico de los pinzones había cambiado a lo largo de generaciones para acomodarse al tamaño de las semillas y los insectos que consumían las aves en cada isla. En *El viaje del Beagle*, publicado a su regreso en 1839, Darwin escribió: "Viendo esa gradación y diversidad de estructura en un grupo reducido de aves estrechamente emparentadas, cabe suponer que a partir de la escasez original de aves en este archipiélago, una especie ha sido modificada con diversos fines".

Veinte años después, esa interpretación de la adaptación de los pinzones a las condiciones de las islas que habitaban se había convertido en toda una teoría de la evolución, basada en la capacidad de la selección natural para asegurar la persistencia en sucesivas generaciones de los rasgos más favorables. La teoría de Darwin, que ha resistido el escrutinio de críticos científicos y religiosos, no constituyó sino el punto de partida de una serie inagotable de cuestiones que siguen inspirando la investigación científica actual. Se desconocen todavía los mecanismos moleculares de la evolución, así como el impacto de la misma sobre el desarrollo de nuevas especies.

Los célebres pinzones de Darwin siguen arrojando luz sobre la evolución. El científico había supuesto que la evolución procedía con lentitud, "en el lapso de eras", un ritmo imperceptible a la escala de la vida humana. Resulta, en cambio, que los pinzones constituyen sujetos ideales para el estudio de la evolución en tiempo real: se reproducen deprisa, medran aislados en islas distintas y no suelen migrar.

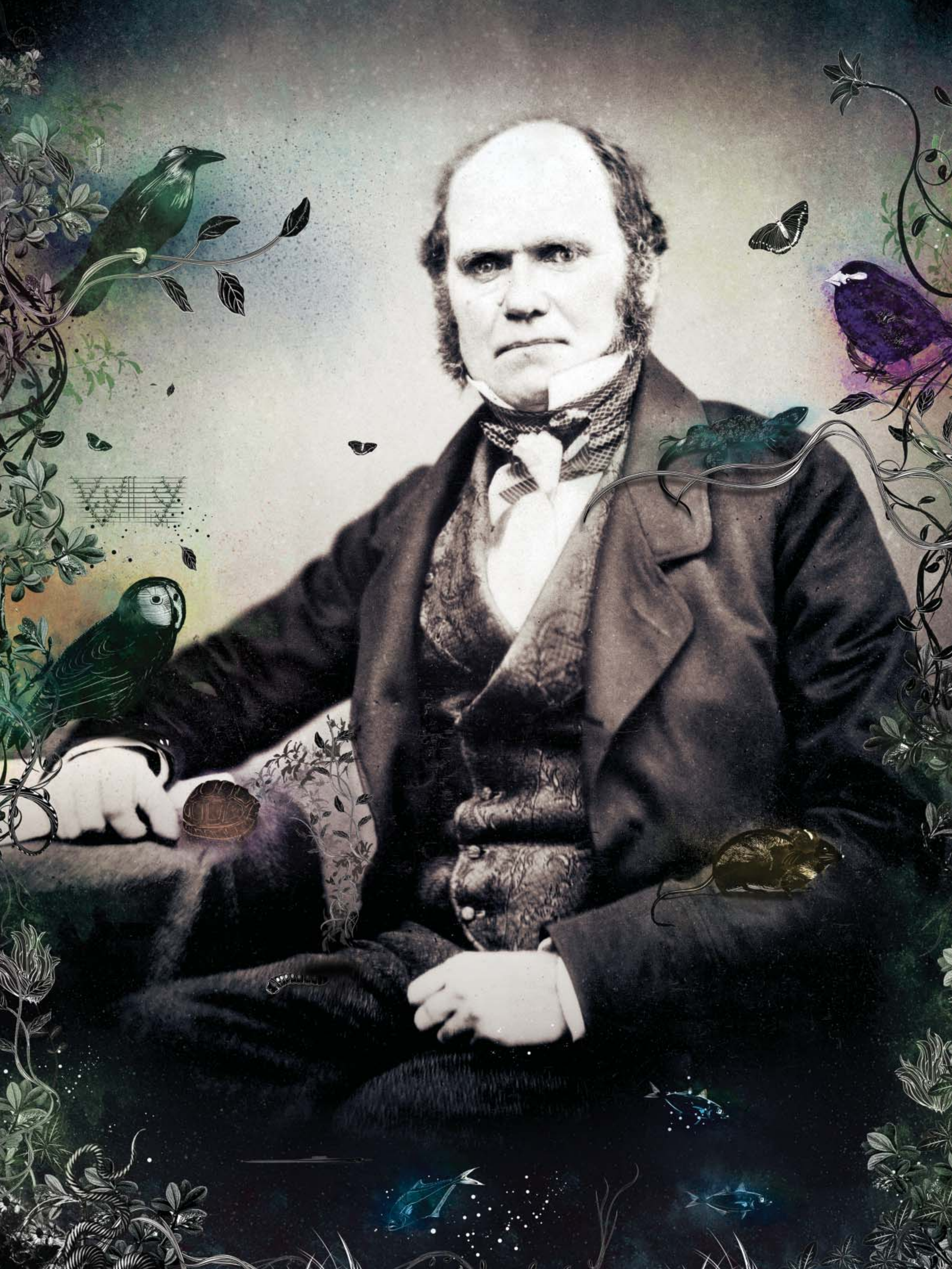
Desde los años setenta del siglo pasado, Peter y Rosemary Grant, de la Universidad de Princeton, han hecho de las Galápagos su laboratorio: un gigantesco recinto donde observar más 20.000 pinzones y demostrar que el tamaño del pico y el cuerpo de las aves cambia de una generación a otra, como consecuencia de las alteraciones climáticas provocadas por el fenómeno de El Niño. Asimismo, han registrado la aparición de nuevas especies de pinzones.

Los Grant dirigen uno de los numerosos grupos de investigación que intentan observar la "evolución en acción": cambios evolutivos bruscos que se miden en años, no en millones de años, en contra de lo que propone la imagen darwinista de una progresión lenta y constante. Esos estudios se centran, entre otras especies, en los peces cíclidos de los Grandes Lagos africanos, los peces espinosos

CONCEPTOS BASICOS

- Las ideas de Charles Darwin sobre la evolución han superado la criba de 150 años.
- La teoría de la evolución ha sido ampliada y modificada por la genética.
- La biología evolutiva sigue estudiando algunas de las mismas cuestiones que preocupaban a Darwin: entre otras, ¿qué es una especie?

DOUG ALVES (*ilustración*); GRANGER COLLECTION (*Darwin*)

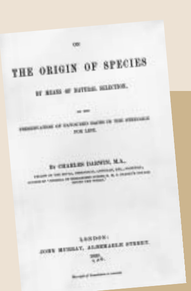


La evolución antes y después de Darwin

El concepto de evolución se remonta a la Antigüedad. Estos son algunos de los hitos de una historia marcada por el cambio continuo.

610-546 a.C.: Anaximandro, filósofo y biólogo griego, sugiere que todas las formas de vida proceden de peces marinos que han evolucionado de manera gradual tras convertirse en organismos terrestres.

1735: Carl von Linné, naturalista sueco, publica el primer volumen de su *Systema Naturae*, la obra que sienta las bases de la taxonomía. Más tarde sugiere que las plantas proceden de un ancestro común.

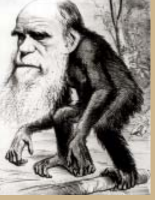

THE ORIGIN OF SPECIES

1838: Darwin formula la teoría de la selección natural; pasarán más de 20 años antes de su publicación.

1859: Se agota de inmediato la primera edición de *El origen de las especies*.

1865: Gregor Mendel, fraile checo, publica sus investigaciones sobre la herencia. La importancia de su trabajo no se reconocerá hasta 35 años después.

1871: En *El origen del hombre*, Darwin vincula el linaje humano con ancestros primates, con la indignación consiguiente de ciertos sectores y la caricaturización de su imagen.



1882: Muere Darwin.

1925: En el caso Scopes, de Tennessee, se juzga a un profesor de acuerdo con una ley que prohíbe la enseñanza de cualquier teoría que niegue la creación divina.



de Alaska y las ranas *Eleutherodactylus* de América Central, Sudamérica y el Caribe.

Equipados con cámaras, ordenadores e instrumentos para la recogida de muestras de ADN que nada tienen que ver con la carga del *Beagle*, los investigadores dan fe de la incesante vitalidad del trabajo de Darwin. Las ideas sobre la evolución (con frecuencia, simples lucubraciones sobre la viabilidad de los más aptos) presentan un pedigrí que se remonta a la Antigüedad, incluso anterior a Sócrates. Los siglos XVIII y XIX fueron fértiles en especulaciones sobre la evolución de la vida, incluidas las de Erasmus Darwin (1731-1802), el abuelo de Charles.

La evolución darwinista fue la primera teoría de este género que superó rigurosos escrutinios científicos, desde su formulación en el siglo XIX hasta nuestros días. La importancia del naturalista para la ciencia básica y las aplicaciones prácticas, desde la biotecnología a la ciencia forense, han motivado la celebración mundial, en 2009, del sesquicentenario de la publicación de su obra maestra, *El origen de las especies*, y la del bicentenario de su nacimiento.

La teoría de Darwin constituye, junto a la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica y otros elementos estructurales, uno de los pilares de la ciencia moderna. Del mismo modo que Copérnico desalojó del centro del universo a la Tierra, Darwin desplazó del epicentro del mundo natural a la especie humana. La selección natural da cuenta de la expresión "diseño sin diseñador", con la que Francisco J. Ayala, de la Universidad de California en Irvine, ridiculiza los intentos vigorosos y persistentes de algunos teólogos para desacreditar la teoría de la evolución. Como escribió Ayala en 2001, "Darwin completó la Revolución Copernicana al extender, al ámbito de la biología, la noción de la naturaleza como un sistema de materia en movimiento regulado por leyes que la razón humana puede comprender sin recurrir a agentes sobrenaturales". El hecho de que todas las formas de vida biológica compartieran un ancestro común era para Darwin una invitación a la humildad. En *El origen del hombre* (1871) escribió que "la estructura corpórea del hombre lleva el sello indeleble de sus humildes orígenes".

Al cumplirse 150 años de la publicación de *El origen de las especies*, el mayor legado de Darwin se halla en las numerosas investigaciones y propuestas teóricas que ha generado su obra. La celebración ofrece también una ocasión para subrayar los profundos cambios que ha sufrido la idea de evolución en este lapso, sobre todo a raíz de la fusión de la teoría original con la genética, que Darwin ignoraba.

Este número especial de *Investigación y Ciencia* presta atención a las principales cuestiones pendientes sobre la selección natural: ¿En qué medida se trata de un fenómeno común? ¿De que modo procede a escala genética y molecular? ¿Cuál es el origen de la variabilidad genética en que se basa la selección natural? ¿Somete a un test de aptitud a genes individuales, organismos enteros o a

UN GENIO CERCANO

Los escritos de Darwin son de fácil comprensión. Así lo demuestra la siguiente descripción de la selección natural y las variaciones en la descendencia, tomada de la introducción de *El origen de las especies*:

"Como de cada especie nacen muchos más individuos de los que pueden sobrevivir y, por tanto, hay que recurrir con frecuencia a la lucha por la existencia, se deduce que cualquier ser, si varía, aunque sea levemente, de algún modo provechoso para él, bajo las complejas y a veces variables condiciones de vida, tendrá mayor probabilidad de sobrevivir y, por tanto, de ser seleccionado de forma natural. Según el vigoroso principio de la herencia, toda variedad seleccionada tenderá a propagar su forma nueva y modificada."

GETTY IMAGES (*Anaximandro*); COLECCION GRANGER (*Catherine y Charles Darwin*); ROSANNE OLSON *Getty Images* (*Gran Cañón*); BETTMANN *Corbis* (H.M.S. Beagle); BETTMANN *Corbis* (*Origen de las especies*); BETTMANN *Corbis* (*Mendel*); THE GALLERY COLLECTION *Corbis* (*caricatura de Darwin*); COLECCION GRANGER (*caso Scopes*); A. BARRINGTON BROWN *Photo Researchers* (*Watson y Crick*); CORTESIA DE LA CATEDRA DE DIVULGACION DE LA CIENCIA DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA (*dibujo de Darwin*)



1809: Nace Charles Darwin (en la foto con su hermana pequeña) en Shrewsbury, Inglaterra, en el seno de una familia acomodada.

1830: Charles Lyell publica sus *Principios de Geología*, que contribuirán a la formación de las ideas de Darwin sobre el gradualismo de los procesos naturales, como los que evidencia el Gran Cañón del Colorado.

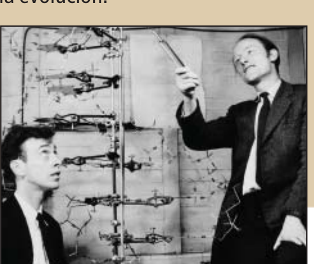




1831: Darwin emprende una vuelta al mundo que durará cinco años a bordo del *HMS Beagle*.

1936-1947: La síntesis moderna combina la teoría de la evolución de Darwin con la genética mendeliana.

1953: James D. Watson y Francis Crick descubren la estructura del ADN, que habrá de permitir el estudio de las bases moleculares de la evolución.



Decenio 2000: El análisis genético demuestra la existencia de una evolución humana reciente, desarrollada hace unos milenios.

2009: El 12 de febrero, día de cumpleaños del naturalista, decenas de actos en numerosos países celebrarán el día de Darwin. Más información en www.darwinday.org



grupos de animales, plantas o microorganismos? ¿Opera sobre los humanos aun cuando tienen la capacidad de controlar su entorno y biología?

Naturalista por naturaleza

Lo mismo que Albert Einstein y otros genios, Darwin marcaba su propio ritmo. No dio muestras de precocidad académica. Nacido en el seno de una familia acomodada de terratenientes, el joven Darwin fue un estudiante mediocre; odiaba la disciplina de un sistema educativo basado en los clásicos. (También Einstein fue un mal estudiante.) Siguiendo los deseos de su padre, Darwin empezó a estudiar medicina; pero su repulsa ante la disección de cadáveres le hizo abandonar la carrera. Paradójicamente, le encantaba cazar pájaros e invertebrados, una de las actividades a las que se dedicaba cuando salía a observar la vida salvaje y a recolectar especímenes.

Temiendo que no iba a conseguir nada en la vida, Robert Darwin obligó a su segundo hijo a matricularse en la Universidad de Cambridge, con el fin de obtener un título que le permitiera acceder al clero. El hombre cuyas ideas son consideradas por algunos un insulto fundamental a la fe religiosa se licenció en teología.

Pese a que su padre intentó disuadirlo, Darwin aceptó sin titubeos el puesto de naturalista de a bordo en el *Beagle*, una nave cuyo viaje de exploración alrededor del mundo iba a proporcionarle "la primera experiencia educativa o formativa de mi vida". A lo largo de los cinco años siguientes, Darwin tuvo la oportunidad de contemplar el mundo natural y reflexionar sobre lo que iba viendo. Esa experiencia determinaría el curso de sus ideas.

Entre los hitos del viaje se encuentra el reconocimiento de la gran diversidad de especies en la zona tropical de Brasil y el descubrimiento de diversos fósiles, entre los cuales destaca el de un perezoso gigante unos 600 kilómetros al sur de Buenos Aires, que le hizo preguntarse por las causas de extinción de tales criaturas. Las historias sobre el asesinato de indígenas a manos de los gauchos de la Pampa argentina le revelaron los impulsos territoriales y primarios del animal humano. Sin olvidar, por supuesto, la estancia breve (cinco semanas) en unas "abrasadoras" Galápagos, que le permitió observar especies muy próximas de tortugas y sinsontes en islas vecinas; ello le sugirió la existencia de un ancestro común para ambos grupos.

Durante la travesía, Darwin leyó ávidamente los dos volúmenes de los *Principios de Geología* de Charles Lyell. Se basaban éstos en un "uniformismo", según el cual los procesos de erosión y sedimentación, así como la actividad volcánica, ocurrieron en el pasado con la misma frecuencia con que ocurren en la actualidad. Lyell rechazaba el catastrofismo prevalente, según el cual la morfología terrestre era el resultado de cambios bruscos y violentos debidos a fuerzas sobrenaturales. Una excursión en Perú, durante la cual encontró depósitos marinos a más de 2000 metros de

"La estructura corpórea del hombre lleva el sello indeleble de sus humildes orígenes."

"Es una maldición para cualquier hombre el hallarse tan absorto en un proyecto como lo estoy yo en el mío."

"Mi mente parece haberse convertido en una máquina que fabrica leyes a partir de grandes conjuntos de datos."

"Eliminar un error es tan provechoso como establecer una nueva verdad o hecho; a veces es incluso mejor."

Charles Darwin

altura, ayudó a convencerle de la plausibilidad de las ideas de Lyell.

Darwin no era consciente de haber emprendido un viaje que transformaría para siempre las ciencias biológicas. A lo largo de los 57 meses que duró, no hubo ningún instante revelador, nada equivalente al *annus mirabilis* de la física (1905), durante el cual Einstein publicó sus artículos fundamentales sobre la relatividad especial, el movimiento browniano y el efecto fotoeléctrico. El cofre del tesoro de la expedición resultó ser lo que hoy llamaríamos una inmensa base de datos: una colección de 363 páginas de notas de zoología y 1383 páginas de notas de geología, un diario de 770 páginas, 1529 especies conservadas en frascos con alcohol, 3907 especímenes disecados y una tortuga viva capturada en las Galápagos.

Al retorno del *Beagle*, en octubre de 1836, las cartas y algunos de los especímenes de Darwin habían circulado ya entre los científicos británicos, cimentando la reputación de Darwin hasta considerarlo uno más de ellos. Ese reconocimiento hizo que su padre dejara de lado la aspiración de ver a su hijo convertido en párroco anglicano. Pocos años después, Darwin contrajo matrimonio con su prima Emma Wedgwood. Se instalaron en una casa de campo cuyos jardines e invernaderos funcionaron como laboratorios hasta la muerte de Darwin en 1882. La fortuna de la familia hizo posible que llevara una vida ajena a las preocupaciones materiales. Una serie de enfermedades no diagnosticadas, cuyos síntomas iban de las migrañas a los espasmos musculares pasando por arritmias, atormentaron a Darwin desde la juventud, por lo que nunca pensó en nuevas expediciones.

Los orígenes de una teoría

Darwin empezó a formular sus teorías a finales del decenio de los treinta del siglo XIX. Pero no las publicó hasta veinte años más tarde, y aun entonces bajo la presión de un competidor, Alfred Russel Wallace, porque quería asegurarse de que los hechos y argumentos que presentaba estaban más allá de toda duda.

La teoría avanzó a ritmo de glaciar. De la lectura de Lyell Darwin tomó la idea de cambio geológico gradual. Razonó que debía ser aplicable a los organismos: una especie da vida a otra. También otros pensadores evolutivos de la época habían reconocido la transformación biológica, pero la concebían en forma de *scala naturae*: una serie ascendente en que cada linaje de plantas o animales surgía por generación espontánea de la materia inanimada, para progresar luego de forma inexorable hacia una mayor complejidad y perfección.

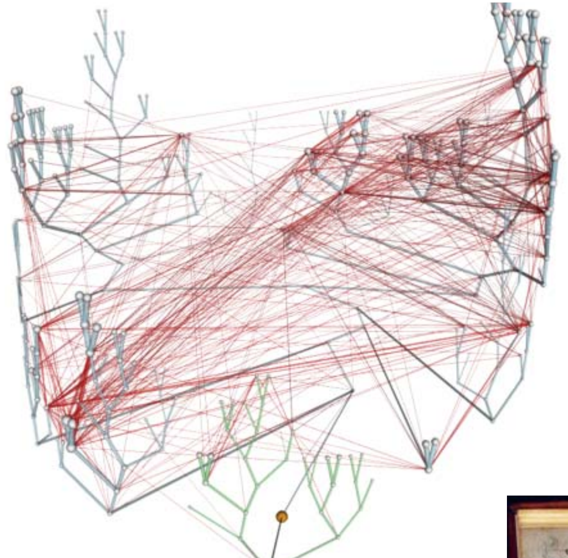
Darwin rechazó esa progresión lineal en beneficio de lo que hoy denominamos evolución ramificada: algunas especies evolucionan siguiendo caminos distintos a partir de un ancestro común; contradecía así la idea predominante de que existían unos límites prefijados a la diferenciación de una nueva especie a partir de una especie precursora. Darwin puso como ejemplo las tres especies de sinsontes que había observado en las Galápagos; procedían de una colonización por parte de una especie relacionada con ellas que había observado en América del Sur. Su esbozo de un "árbol de la vida" ramificado constituye la única ilustración de *El origen de las especies.*

Con todo, el árbol de la vida no explicaba el mecanismo de la evolución. La respuesta de Darwin constituye su idea más revolucionaria: la teoría de la selección natural. A partir de la lectura de la obra de Thomas Malthus, Darwin advirtió que las poblaciones tienden a crecer rápidamente, de modo que sus necesidades exceden con mucho unos recursos limitados. Su obsesión por la cría de plantas y animales le llevó a frecuentar las ferias de agricultura y a coleccionar catálogos de plantas.

En 1837 llegó a la conclusión (compartida inicialmente con unos pocos amigos) de que el mundo natural no escogía de forma deliberada las características más favorables, como haría un criador de ganado, sino que tenía su propia forma de tratar las explosiones demográficas que amenazaban con agotar un nicho ecológico. La selección natural prescinde ciegamente de los individuos con características menos favorables, de entre la enorme diversidad hereditaria de una especie determinada: en esencia, el conciso "diseño sin diseñador" de Ayala. Además, si dos poblaciones de la misma especie permanecen aisladas (una en el desierto, la otra en las montañas) devendrán con el tiempo dos especies completamente separadas, incapaces de cruzarse.

1. El DARWINISMO SOCIAL y el movimiento eugenésico de finales del siglo XIX y principios del XX fueron intentos pseudocientíficos, hoy desacreditados, de aplicación de las ideas de Darwin a la planificación social. En la imagen, un antropólogo alemán intentando determinar las características del ojo ario.

GRANGER COLLECTION



2. EL ARBOL DE LA VIDA, esbozado por Darwin en 1837 (*abajo*), sigue vivo en forma de modelo informático multidimensional, sumamente intrincado (*izquierda*). Este muestra el modo en que la evolución avanza no sólo a través de ramificaciones sucesivas, sino también mediante la transferencia lateral de genes entre microorganismos (*líneas rojas*).

CORTESIA DEL LABORATORIO EUROPEO DE BIOLOGIA MOLECULAR (*modelo informático*); WILLIAM PERLMAN *Corbis* (*esbozo*)

El origen de las especies se imprimió de forma apresurada en 1859 porque Wallace contaba con un manuscrito que llegaba a conclusiones casi idénticas. Los primeros 1500 ejemplares de ese "resumen" de 155.000 palabras se agotaron inmediatamente, prueba de la claridad y accesibilidad del razonamiento de Darwin. A diferencia de lo que ocurriría con las teorías de Einstein, nadie se quejó ni alardeó de que hubiera sólo tres personas en el mundo que pudieran entenderlo.

Darwin siguió estudiando la selección natural a través de las orquídeas y otras plantas durante el resto de su vida, en su retiro campestre en Downe, a unos 25 kilómetros al sur de Londres. A otros dejó la tarea de defender su obra. La publicación de *El origen de las especies* provocó una controversia que adopta en nuestros días la forma de debates creacionistas en la dirección de algunas escuelas. En un artículo aparecido en *Scientific American* el 17 de noviembre de 1860, se daba cuenta de una reunión de la Asociación Británica para el Progreso de las Ciencias, durante la cual un tal Sir B. Brodie habría rechazado la hipótesis de Darwin con estas palabras: "La capacidad de autoconciencia y sus principios distinguen al hombre del resto del mundo material, y no veo cómo se hubieran podido originar en organismos inferiores. Esta capacidad humana es idéntica a la inteligencia divina". Sin embargo, científicos destacados apoyaban las ideas de Darwin. Según el artículo mencionado, durante la misma reunión, el célebre Joseph Hooker replicó al obispo de Oxford, otro de los críticos presentes, que el clero sencillamente no comprendía la obra de Darwin.

Si en *El origen de las especies* Darwin había evitado la cuestión de la evolución humana, en *El origen del hombre* relacionó a los primeros humanos con los monos del Viejo Mundo, una aseveración que resultó ofensiva para muchas personas e inspiró las caricaturas del científico mitad hombre, mitad simio. Ya en los años sesenta del siglo XIX, el primo de Darwin, Francis Galton, se había quejado de que la sociedad moderna protegiera de la selección natural a sus miembros "menos aptos". No había sido el único en hacerlo. Las lecturas distorsionadas o equívocas del darwinismo no han cesado desde entonces, ya sean las de ideólogos nazis, economistas neoliberales o las procedentes de la cultura popular. En palabras del novelista Kurt Vonnegut, Darwin "nos enseñó que los que mueren tenían que morir y que los cadáveres representan mejoras".

El concepto de evolución como una forma de descendencia ramificada a partir de un ancestro común fue pronto asimilado; no así la selección natural, cuya aceptación, incluso en el seno de la comunidad científica, se demoró mucho más. No resulta difícil entender la razón de tales dudas. Darwin no había descrito en su obra ningún mecanismo de la herencia; la atribuía a unas hipotéticas y minúsculas "gémulas" que, tras emanar de cada uno de los tejidos, viajaban hasta los órganos sexuales, donde eran copiadas y transmitidas a las generaciones siguientes. La teoría de la evolución no fue ampliamente aceptada hasta los años treinta y cuarenta del siglo pasado.

Emergió entonces una síntesis neodarwinista que conciliaba la selección natural de Darwin y la genética de Mendel. En 1959, año del centenario de la publicación de *El origen de las especies,* la selección natural parecía afianzada en el seno de la teoría, pero desde entonces el horizonte de la biología evolutiva no ha dejado de dilatarse al hilo de nuevas cuestiones. ¿Procede la evolución a saltos, alternando períodos de intensos cambios con largos períodos de inactividad? ¿Existe la "deriva genética", proceso por el cual las mutaciones azarosas con frecuencia se transmiten o desaparecen sin haber tenido efecto adaptativo alguno? ¿Representa cada rasgo biológico una adaptación evolutiva o algunas de ellas son simples productos casuales y secundarios de una característica física que concede cierta ventaja en la lucha por la supervivencia?

También se ha recuperado una idea rechazada por Darwin: que la selección natural de grupos enteros explica los rasgos altruistas. Y, en lo que atañe al origen de las especies, el hecho de que los organismos unicelulares intercambien conjuntos de genes, ¿cuestiona la noción de especie, definida por la incapacidad de grupos de organismos para reproducirse entre sí? La intensidad sostenida de esos debates da fe del vigor de la biología evolutiva y de la vigencia del legado de Darwin.

Bibliografía complementaria

WHAT EVOLUTION IS. Ernst Mayr. Basic Books, 2001.

THE CAMBRIDGE COMPANION TO DARWIN. Dirigido por Jonathan Hodge y Gregory Radick. Cambridge University Press, 2003.

ON THE ORIGIN OF SPECIES: THE ILLUSTRATED EDITION. Sterling, 2008.



Genética de la selección natural

La investigación genética está demostrando que la selección natural desempeña en la evolución de los genes una función mayor de la admitida

• • • H. ALLEN ORR

Algunos conceptos se han desarrollado tarde en la historia de una disciplina científica, debido a su complejidad, sutileza o dificultad. La selección natural no fue uno de ésos. Aunque, comparada con otras ideas científicas revolucionarias, su concepción ha sido reciente —Charles Darwin y Alfred Russel Wallace escribieron sobre la misma en 1858; *El origen de las especies* de Darwin se publicó en 1859—, la teoría de la selección natural se construye sobre ideas de elegante simplicidad. En unas condiciones dadas, unos organismos sobreviven mejor que otros. Aquéllos dejan mayor número de descendientes, con lo que llegan a ser, andando el tiempo, predominantes. De ese modo, el ambiente "selecciona" a los organismos mejor adaptados a las condiciones actuales. Si las condiciones ambientales cambian, predominarán los organismos que posean las características mejor adaptadas al nuevo ambiente. El darwinismo fue revolucionario, no porque presentara afirmaciones obscuras de la biología, sino porque sugirió una lógica natural de extrema sencillez.

A pesar de esa simplicidad, la teoría de la selección natural ha recorrido un largo y tortuoso camino. La afirmación de Darwin de que las especies evolucionaban fue bien recibida por los biólogos; no así la hipótesis de que la selección natural regía buena parte de los cambios evolutivos. Es más, la selección natural no se aceptó como fuerza motriz de la evolución hasta bien entrado el siglo xx.

El estatuto de la selección natural se halla ahora asentado, tras decenios de trabajo empírico tenaz. Pero el estudio de este proceso no ha terminado. Debido al desarrollo de nuevas técnicas experimentales y al creciente interés en los mecanismos que subyacen bajo la selección natural, la investigación sobre ese dominio conoce hoy de mayor actividad que dos decenios atrás. Los trabajos experimentales en curso sobre la selección natural se centran en tres cuestiones: ¿se trata de un proceso común? ¿Qué cambios genéticos dan lugar a las adaptaciones producidas por selección natural? ¿Cuál es la función de la selección natural en la especiación?

CONCEPTOS BASICOS

- Charles Darwin propuso que la selección natural dirigía la evolución mediante cambios heredados que aumentaban la supervivencia. Esta hipótesis tuvo que competir con otras teorías hasta alcanzar la aceptación actual.
- Se creía que las mutaciones genéticas aleatorias, que no tienen efectos positivos ni negativos, eran responsables de muchos de los cambios a escala molecular. Sin embargo, experimentos recientes muestran que la selección natural de mutaciones génicas beneficiosas es bastante común.
- Estudios de la genética de las plantas muestran que los cambios en un gen pueden ejercer efectos notables en las diferencias adaptativas entre especies.

El concepto

La mejor forma de apreciar la evolución que se produce mediante selección natural consiste en estudiar organismos cuyo ciclo biológico sea tan corto que nos permita observar muchas generaciones. Algunas bacterias se reproducen, se dividen, cada media hora. Imaginemos una población bacteriana formada por dos tipos

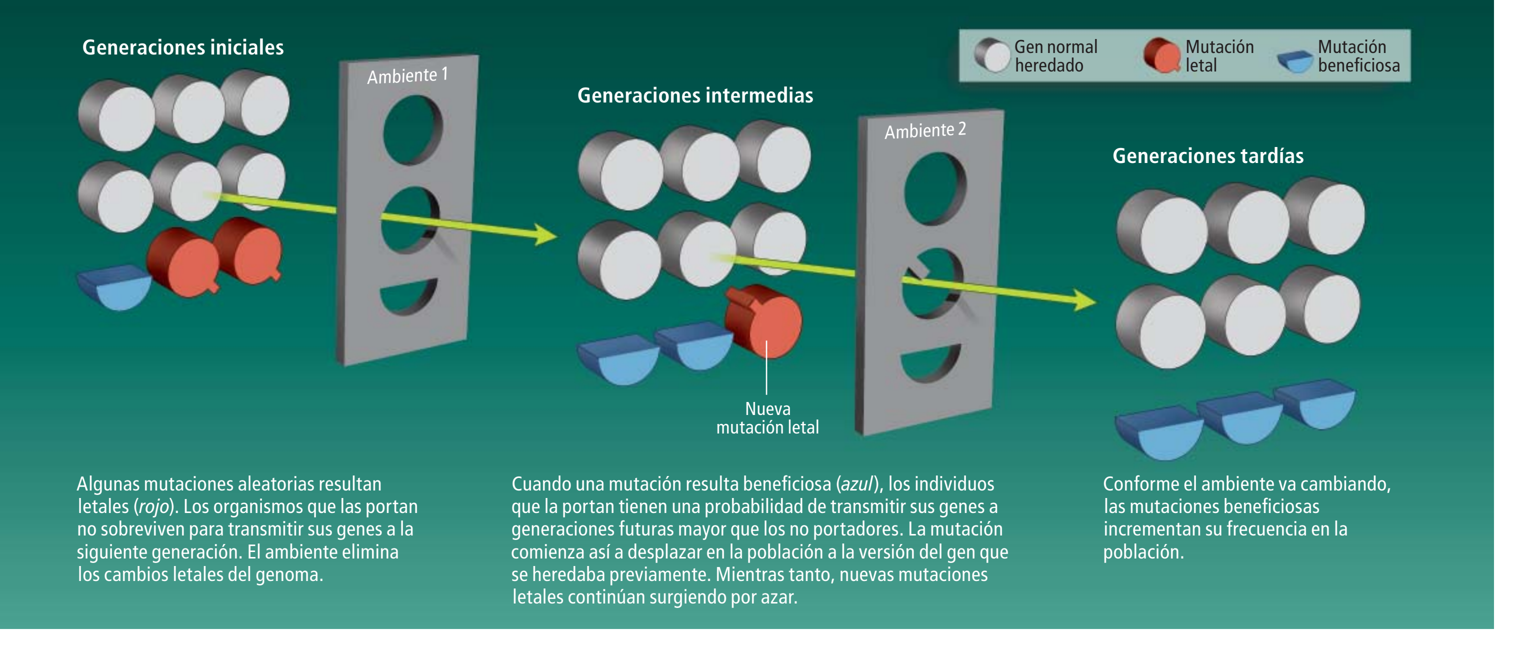
EL ARTE del taxidermista y la pericia del conservador se combinan para mostrar la variedad de formas vivas a que la evolución ha dado lugar en el reino animal. La fotografía se tomó en la sala de biodiversidad del Museo de Historia Natural de Nueva York.

GRANT DELIN



○ ○ ○ Mutación y selección natural

La evolución mediante selección natural corresponde a un proceso de dos pasos: primero surgen en la población mutaciones genéticas aleatorias; después, el ambiente escruta los organismos que portan dichas mutaciones.



Algunas mutaciones aleatorias resultan letales (*rojo*). Los organismos que las portan no sobreviven para transmitir sus genes a la siguiente generación. El ambiente elimina los cambios letales del genoma.

Cuando una mutación resulta beneficiosa (*azul*), los individuos que la portan tienen una probabilidad de transmitir sus genes a generaciones futuras mayor que los no portadores. La mutación comienza así a desplazar en la población a la versión del gen que se heredaba previamente. Mientras tanto, nuevas mutaciones letales continúan surgiendo por azar.

Conforme el ambiente va cambiando, las mutaciones beneficiosas incrementan su frecuencia en la población.

TOMMY MOORMAN

genéticos que inicialmente se componen del mismo número de células. Las bacterias de tipo 1 producen sólo descendientes de tipo 1 y las de tipo 2 producen sólo descendientes de tipo 2. Supongamos que el ambiente cambia repentinamente, por la introducción de un antibiótico, y que las bacterias de tipo 1 son resistentes al mismo pero no las de tipo 2. En el nuevo entorno, las del tipo 1 serán más eficaces, es decir, estarán mejor adaptadas, que las de tipo 2. La supervivencia y, por tanto, la tasa de reproducción serán mayores en las de tipo 1. Las de tipo 1 producirán más descendientes que las de tipo 2.

El concepto de "eficacia biológica" expresa la probabilidad de sobrevivir o reproducirse en un ambiente dado. El resultado de esa selección, repetida innumerables veces en diferentes contextos, es lo que observamos en la naturaleza: plantas y animales (y bacterias) que se adaptan de diversas maneras a su entorno.

Los expertos desmenuzan el argumento precedente en detalles biológicos más ricos. Se sabe que las variantes genéticas se originan por mutaciones en el ADN, es decir, cambios aleatorios en la secuencia nucleotídica (la cadena de letras A, G, C y T) que constituye el "lenguaje" del genoma. Se conoce también la tasa a la que surge un tipo de mutación común (el cambio de una letra del ADN por otra): cada nucleótido de cada gameto en cada generación tiene una opción sobre mil millones de mutar a otro nucleótido. Más importante todavía, se han descubierto algunos de los efectos de las mutaciones sobre la eficacia biológica. La inmensa mayoría de las mutaciones aleatorias resultan perjudiciales (reducen la eficacia biológica); sólo una pequeña minoría resultan beneficiosas (incrementan la eficacia biológica). Las mutaciones suelen resultar dañinas por la misma razón que muchos errores en los códigos informáticos: en sistemas exquisitamente afinados, las modificaciones aleatorias, por minúsculas que sean, tienden a alterar, más que a mejorar, una función.

La evolución adaptativa constituye, por tanto, un proceso de dos pasos, en el que se da una estricta división del trabajo entre la mutación y la selección. En cada generación, las mutaciones aportan a la población nuevas variantes génicas. La selección natural hace una criba: según el ambiente, reduce la frecuencia de las variantes "malas" (no adaptativas) e incrementa la frecuencia de las "buenas" (adaptativas). Una población cuenta con numerosas variantes génicas, una suerte de arsenal que le ayuda a enfrentarse a los cambios ambientales. El gen que protege del antibiótico a las bacterias de tipo 1, por ejemplo, puede que anteriormente, en un medio sin fármaco, resultara inútil o incluso perjudicial; en el nuevo ambiente, en cambio, permite la supervivencia de las bacterias de tipo 1.

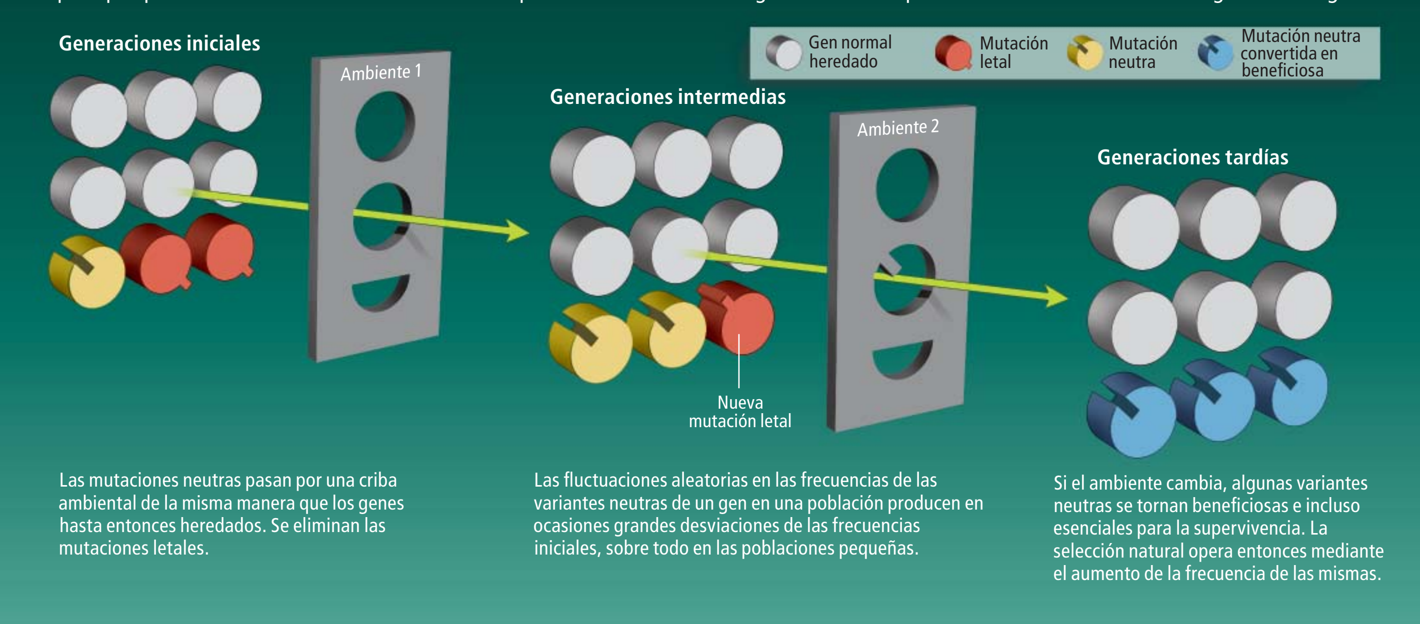
También la biología matemática ha arrojado luz sobre la selección natural. Se ha demostrado que cuanto más adaptativa es una

El autor

H. Allen Orr ocupa la cátedra Shirley Cox Kearns de biología en la Universidad de Rochester. Investiga las bases genéticas de la especiación y la adaptación. Recibió la medalla Darwin-Wallace otorgada por la Sociedad Linneana de Londres y el premio Dobzhansky de la Sociedad para el Estudio de la Evolución.

Evolución neutra y deriva genética

Se creía que muchas de las mutaciones génicas que persisten en la población durante múltiples generaciones eran neutras (*amarillo*), es decir, sin efecto en la supervivencia ni en la reproducción. En un proceso de deriva genética, esos cambios en la población fluctúan de forma aleatoria de una generación a otra. La supuesta abundancia de las mutaciones neutras fue la razón por la que se pensó que la deriva genética, y no la selección natural, era la fuerza principal que modulaba los cambios en el ADN de las poblaciones. Nuevos hallazgos demuestran que también la selección natural dirige el cambio génico.



Las mutaciones neutras pasan por una criba ambiental de la misma manera que los genes hasta entonces heredados. Se eliminan las mutaciones letales.

Las fluctuaciones aleatorias en las frecuencias de las variantes neutras de un gen en una población producen en ocasiones grandes desviaciones de las frecuencias iniciales, sobre todo en las poblaciones pequeñas.

Si el ambiente cambia, algunas variantes neutras se tornan beneficiosas e incluso esenciales para la supervivencia. La selección natural opera entonces mediante el aumento de la frecuencia de las mismas.

TOMMY MOORMAN

variante génica, mayor es el incremento de su frecuencia en la población. Puede calcularse incluso la tasa de ese incremento. Y se ha descubierto que la selección natural es una "vigilante" incansable: detecta, entre variantes génicas, diferencias en eficacia biológica asombrosamente pequeñas (de una parte entre un millón, en una población de un millón de individuos).

Un punto destacable de la argumentación en pro de la selección natural es que su lógica parece válida para cualquier nivel y entidad biológica: de genes a especies. Desde Darwin, los biólogos han considerado que las diferencias en eficacia biológica se daban entre individuos. Sin embargo, la selección natural operaría, en principio, también sobre otras entidades biológicas. Podría pensarse que las especies con una amplia distribución geográfica presentarán tasas de supervivencia (como especie) mayores que las especies de área geográfica limitada. Después de todo, las especies con una distribución amplia toleran con mayor facilidad que las especies con un área restringida la extinción de algunas poblaciones locales. Según esa lógica de la selección natural, con el tiempo debería incrementar la proporción de especies con una distribución amplia.

Aunque ese argumento se considera formalmente correcto (los evolucionistas sospechan que la selección opera, en ocasiones, a un nivel superior), suele aceptarse que la selección natural actúa especialmente sobre individuos o variantes génicas. Una de las razones a favor de esa hipótesis es que la vida de un individuo es mucho más corta que la de una especie. Por tanto, la selección natural de individuos supera con creces la selección natural de las especies.

¿Es común la selección natural?

Una de las cuestiones de apariencia más sencilla que se han planteado sobre la selección natural ha resultado ser una de las más complejas. ¿En qué grado es responsable la selección natural de los cambios en el acervo génico de una población? Nadie pone en duda que la selección natural dirige la evolución de la mayoría de los caracteres físicos de los seres vivos. ¿Cómo explicar sino estructuras tan distintas como los picos, los bíceps y los cerebros? Sin embargo, se desconoce en qué medida la selección natural determina los cambios que se producen a escala molecular. En otras palabras, ¿qué proporción del cambio evolutivo acumulado en el ADN tras millones y millones de años se debe a la selección natural?

Hasta los años sesenta del siglo pasado, se dio por supuesto que la respuesta a la pregunta anterior era "casi el ciento por ciento". Pero un grupo de genéticos de poblaciones, liderado por Motoo Kimura, cuestionó abiertamente esa visión. Kimura adujo que la evolución molecular no estaba dirigida por la selección

natural “positiva”, en la que una variante rara o minoritaria incrementara su frecuencia por la selección del medio, sino que casi todas las mutaciones que persistían o alcanzaban tasas elevadas en una población eran neutras desde el punto de vista de la selección, es decir, no ejercían ningún efecto apreciable (positivo o negativo) sobre la eficacia biológica. Por supuesto, las mutaciones perjudiciales siguen surgiendo a una tasa elevada, pero al no alcanzar frecuencias altas, constituyen vías evolutivas sin salida. Dado que las mutaciones neutras son prácticamente invisibles en el ambiente actual, ese tipo de cambios se propagan sigilosamente por la población, alterando con el tiempo el acervo génico de la misma. Estamos hablando de la deriva genética aleatoria, núcleo de la teoría neutralista de la evolución molecular.

Hacia los años ochenta del siglo pasado, muchos genetistas evolutivos habían ya aceptado la teoría neutralista. Pero los datos que la respaldaban eran, sobre todo, indirectos. Faltaban pruebas más sólidas. Dos avances han facilitado la superación del obstáculo. En primer lugar, se han ideado pruebas estadísticas sencillas para distinguir cambios neutros de cambios adaptativos en el genoma. En segundo lugar, las nuevas técnicas han permitido secuenciar genomas completos de diversas especies, proporcionando una ingente cantidad de datos a los que se aplican las pruebas estadísticas aludidas. Los nuevos datos sugieren que la teoría neutralista subestima la importancia de la selección natural.

En un estudio del grupo de David J. Begun y Charles H. Langley, de la Universidad de California en Davis, se compararon las secuencias de ADN de dos especies de moscas de la fruta del género *Drosophila*. Se analizaron unos 6000 genes de cada especie; se centró la atención en los genes que habían divergido desde que las dos especies se separaron del ancestro común. Mediante las pruebas estadísticas, se estimó que la evolución neutra podía excluirse, por lo menos, en un 19 por ciento de los 6000 genes. En otras palabras, la selección natural era responsable de la divergencia evolutiva de una quinta parte de los genes estudiados. (Dado que se usó una prueba estadística conservadora, la proporción podría ser, en realidad, mucho mayor.)

De ese resultado no se desprende que la evolución neutra sea irrelevante; después de todo, algunos de los genes del 81 por ciento restante debieron de evolucionar por deriva genética. Lo que sí demuestra es que la selección natural desempeña una función en la divergencia de las especies mucho más importante de lo que suponían los defensores de la evolución neutra. Estudios similares indican que la selección natural suele dirigir el cambio evolutivo, incluso en las secuencias de ADN.

Genética de la selección natural

Los biólogos que estudian las características físicas normales (picos, bíceps o cerebro) saben que la selección natural ha sido la responsable del cambio evolutivo. Sin embargo, a menudo ignoran cómo ha ocurrido. Hasta fecha reciente, apenas se conocían cambios genéticos responsables de la evolución adaptativa. Merced a los nuevos avances genéticos, podemos ahora abordar esta y otras cuestiones fundamentales sobre la selección. Cuando los organismos se adaptan mediante selección natural a un ambiente nuevo, ¿lo hacen debido a cambios en unos pocos genes o en muchos? ¿Podrían identificarse esos genes? ¿Están implicados los mismos genes en casos independientes de adaptación al mismo ambiente?

No resulta fácil responder a las preguntas anteriores. La principal dificultad reside en que el incremento de la eficacia biológica debido una mutación beneficiosa puede ser muy pequeño, con la consiguiente parsimonia en los cambios evolutivos. Una solución consiste en colocar poblaciones de individuos con una elevada tasa de reproducción en ambientes artificiales, donde las diferencias en eficacia biológica sean mayores y, por tanto, más rápida la evolución. Conviene que el número de individuos de las poblaciones sea suficiente para proporcionar un flujo continuo de mutaciones. En dichos experimentos evolutivos, suele colocarse una población de microorganismos genéticamente idénticos en un ambiente nuevo al que deben adaptarse. Como todos los individuos empiezan compartiendo la misma secuencia de ADN, la selección natural opera sólo sobre las mutaciones surgidas durante el experimento. Se registra el cambio de la eficacia biológica en el tiempo mediante la medida de la tasa de reproducción en el nuevo ambiente.

Algunas de las investigaciones sobre evolución más interesantes se han llevado a cabo con bacteriófagos, virus que infectan a bacterias. El tamaño reducido del genoma de los bacteriófagos permite la secuenciación completa del mismo al inicio, al final o en cualquier momento del experimento. Ello facilita la detección de cualquier cambio genético que la selección natural “aprehenda” y perpetúe luego en el tiempo.

K. Kichler Holder y James J. Bull, de la Universidad de Texas en Austin, realizaron un experimento con dos especies de bacteriófagos estrechamente relacionadas: ΦX174 y G4. Ambos virus infectan a *Escherichia coli*, la bacteria intestinal común. Los bacteriófagos

LA EVOLUCION EN ACCION

En algunos animales, los cambios adaptativos se han producido con la rapidez suficiente como para poderlos observar.



Conejo salvaje (Australia)
Conforme se adaptaban al clima caluroso y seco de Australia, los animales traídos desde Europa cambiaron el tamaño corporal, el peso y el tamaño de las orejas.



I-iwi, *Vestiaria coccinea* (Hawai)
Conforme su fuente de néctar preferido empezó a desaparecer, esta ave buscó el néctar en cualquier otro sitio. Se le ha acortado el pico.



Caracol marino (Nueva Inglaterra)
La concha de los caracoles cambia de forma y aumenta en grosor, en respuesta a su depredador, el cangrejo marino.

ERIC WANDERS *Minden Pictures* (*conejo europeo*); CHUCK BABBITT (*I-iwi*); CHRISTOPHE COURTEAU *NPL* (*caracol marino*)

se expusieron a una temperatura excepcionalmente elevada para que se adaptaran al nuevo ambiente cálido. En ambas especies, la eficacia biológica aumentó drásticamente en el ambiente nuevo, en el transcurso del experimento. Con mayor precisión, en ambos casos la eficacia biológica mejoró rápidamente al comienzo del experimento y se estabilizó con el tiempo. Holder y Bull identificaron las mutaciones génicas que causaban el aumento de la eficacia biológica.

Selección en la naturaleza

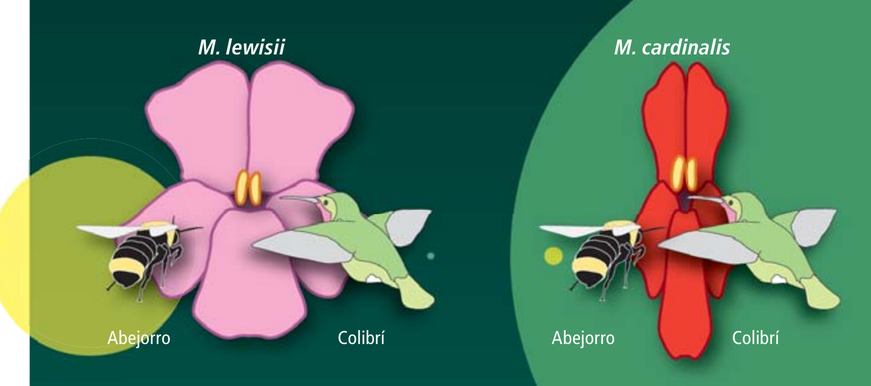
Aunque los estudios experimentales de la evolución suministran una visión sin precedentes de una selección natural en marcha, se limitan a organismos sencillos en los que la secuenciación repetida del genoma completo resulta factible. Pero podría ocurrir que las condiciones del experimento estuvieran imponiendo una presión selectiva mayor que la que se da en la naturaleza. Sería interesante, pues, realizar estudios en organismos superiores en condiciones más naturales. (Para ello debería diseñarse otro método, que permitiera investigar el ritmo glacial de la mayor parte del cambio evolutivo.)

Los evolucionistas suelen centrarse en poblaciones o especies que han estado separadas durante tiempo suficiente, para poder descubrir las diferencias adaptativas producidas por la selección natural y someterlas luego a escrutinio genético. Douglas W. Schemske, de la Universidad estatal de Michigan, y H. D. Bradshaw Jr., de la Universidad de Washington, analizaron el efecto de la selección natural en dos especies de plantas del género *Mimulus*. Mientras que la polinización primaria de *Mimulus lewisii* la realizan los abejorros, la de *M. cardinalis*, especie íntimamente emparentada, la llevan a cabo los colibríes. Los datos obtenidos a partir de otras especies muestran que en el género *Mimulus* la polinización por aves evolucionó a partir de la polinización por abejas.

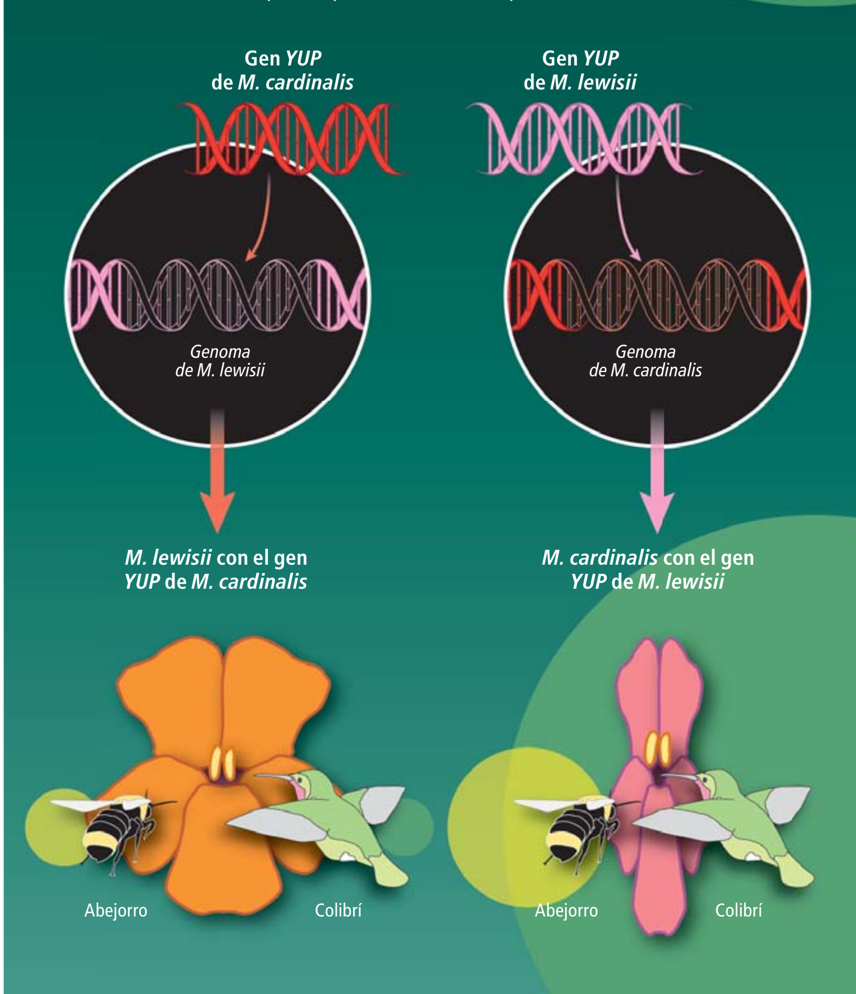
M. lewisii tiene flores rosas; *M. cardinalis*, rojas. El color de la flor explica muchas de las diferencias en la preferencia del polinizador. Cuando Schemske y Bradshaw cruzaron las dos especies, observaron que las diferencias en el color de la flor estaban controladas en gran parte por lo que pareció ser un solo gen, el *Yellow Upper* o *YUP*. A partir de esos hallazgos, produjeron dos tipos de híbrido. En los híbridos de un tipo, *YUP* provenía de *M. cardinalis* y el resto del genoma de *M. lewisii*; las flores resultantes eran naranjas. El otro tipo de híbridos correspondía a la imagen especular del anterior: el gen *YUP* provenía de *M. lewisii*, el resto del genoma de *M. cardinalis* y las flores eran rosas.

Especiación con un solo gen

Dos especies del género *Mimulus* que rara vez se cruzan en la naturaleza deben gran parte de su aislamiento reproductivo a los polinizadores: a *M. lewisii* la polinizan casi siempre los abejorros y casi nunca los pájaros (*abajo, izquierda*); *M. cardinalis* muestra un patrón inverso: la polinizan casi siempre los pájaros y casi nunca los abejorros (*abajo, derecha*). El color de las flores explica en buena medida tales diferencias. Del control de las diferencias cromáticas se encarga sobre todo un gen: el *Yellow Upper* o *YUP*. En el esquema, el área del círculo amarillo y el del círculo verde reflejan la frecuencia de las visitas de los polinizadores.



Estudios en *Mimulus* muestran que las mutaciones en lo que parece ser un solo gen contribuyen a la divergencia de una nueva especie. Se crearon dos tipos de híbridos mediante el desplazamiento de una pequeña región cromosómica que contiene *YUP*. Los colibríes visitaron 68 veces más al híbrido *M. lewisii* que a la planta *M. lewisii* pura. De manera similar, los abejorros visitaron al híbrido *M. cardinalis* 74 veces más que a la planta *M. cardinalis* pura.



TOMMY MOORMAN

Cuando trasplantaron los híbridos a su hábitat natural, observaron que *YUP* ejercía un efecto notable sobre los polinizadores. Los colibríes visitaron alrededor de 68 veces más las plantas *M. lewisii* portadoras del *YUP* de *M. cardinalis* que las plantas *M. lewisii* puras. En el experimento recíproco (plantas *M. cardinalis* con *YUP* de *M. lewisii*) aumentaron a 74 veces más las visitas de los abejorros. Por tanto, *YUP* desempeñó una función clave en la evolución de la polinización por aves en *M. cardinalis.* Los estudios de Schemske y Bradshaw demostraron que la selección natural puede construir adaptaciones a partir de un gen.

El origen de las especies

Una de las afirmaciones más destacadas de Darwin era que la selección natural explicaba la formación de nuevas especies; después de todo, el título de su obra maestra es *El origen de las especies*. Sin embargo, ¿es ello cierto? ¿Qué función desempeña la selección natural en la especiación, la bifurcación de un linaje? Estas cuestiones siguen ocupando hoy una posición central en la biología evolutiva.

Para entender el debate sobre la especiación, debemos antes comprender el significado del término "especie". A diferencia de Darwin, los biólogos modernos suelen adherirse al "concepto biológico" de especie: las especies están reproductivamente aisladas entre sí, es decir, su constitución genética evita el intercambio de genes. En otras palabras, cada especie está dotada de un acervo génico propio.

Se considera que dos poblaciones deben estar geográficamente aisladas para que se produzca el aislamiento reproductivo. Los pinzones, que habitan varias de las islas Galápagos, famosos porque Darwin los describió en *El origen de las especies*, divergieron en las especies que hoy conocemos, una vez se encontraron aislados desde el punto de vista geográfico.

La evolución del aislamiento reproductivo se da de varias maneras. Durante el cortejo, la hembra de una especie puede rechazar a los machos de otra (si las dos especies entran en contacto geográfico). Las hembras de la mariposa *Pieris occidentalis* no se aparean con los machos de la especie cercana *P. protodice* probablemente porque los machos de cada especie exhiben un patrón alar distinto. Aun cuando ambas especies realizaran el cortejo y se apareasen, la falta de viabilidad o la esterilidad de los híbridos resultantes constituirá otra forma de aislamiento reproductivo: si todos los híbridos, descendientes de dos especies, mueren o son estériles, los genes no fluyen de una especie a otra. Para los biólogos contemporáneos, la cuestión de si la selección natural dirige el origen de las especies se reduce a la pregunta de si la selección es responsable del aislamiento reproductivo.

Durante la mayor parte del siglo XX, se creyó que la repuesta a la cuestión anterior era negativa. Se pensaba que el factor crítico en el proceso de especiación correspondía a la deriva genética. Investigaciones recientes sobre el origen de las especies sugieren que la hipótesis de la deriva genética es errónea. La selección natural desempeña una función clave en la especiación.

Constituye un buen ejemplo de ello la historia evolutiva de las dos especies *Mimulus* mencionadas. Dado que los polinizadores rara vez se equivocan al elegir la especie de *Mimulus* que visitan, las dos especies permanecen aisladas en cuanto a su reproducción. Aunque ambas especies coincidan en la misma área de Norteamérica, un abejorro que visita *M. lewisii* rara vez visitará *M. cardinalis* y el colibrí que visita *M. cardinalis* rara vez visitará *M. lewisii*. Así, el polen difícilmente se transferirá entre las dos especies. Schemske y sus colaboradores demostraron que el 98 por ciento del bloqueo total en el flujo genético entre las dos especies se debía al polinizador. La selección natural moldeó, pues, la adaptación de las plantas a los polinizadores, con lo que produjo un fuerte aislamiento reproductivo.

Otra prueba de la función de la selección natural en la especiación ha venido de un lugar inesperado. En los últimos decenios se han identificado media docena de genes que causan en los híbridos esterilidad o inviabilidad. Esos genes, estudiados sobre todo en moscas de la fruta (*Drosophila*), desarrollan varias funciones normales: codifican enzimas, proteínas estructurales y proteínas de unión al ADN.

Esos genes exhiben dos patrones llamativos. Primero, muchos de los genes que causan problemas en los descendientes híbridos han divergido muy rápidamente. Segundo, los estudios de genética de poblaciones demuestran que esa evolución acelerada estuvo guiada por la selección natural.

Los estudios de *Mimulus* y la esterilidad de los híbridos en las moscas de la fruta son sólo la punta del iceberg de una extensa y creciente bibliografía que revela la mano de la selección natural en la especiación. La selección natural constituye una fuerza evolutiva clave, que no dirige sólo los cambios evolutivos dentro de las especies, sino también el origen de especies nuevas. Aunque algunos profanos sigan cuestionando la adecuación y aceptación de la selección natural, el estatuto que hace algunos decenios adquirió entre los biólogos evolutivos no hace sino consolidarse.

Bibliografía complementaria

POLLINATORS PREFERENCE AND THE EVOLUTION OF FLORAL TRAITS IN MONKEYFLOWERS (MIMULUS). Douglas W. Schemeske y H. D Bradshaw, Jr. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 96, n.º 21, pág. 11.919-11.915; 12 de octubre, 1999.

THE ECOLOGY OF ADAPTATIVE RADIATION. Dolph Schulter. Oxford University Press, 2000.

SPECIATION. Jerry A. Coyne y H. Allen Orr. Sinauer Associates, 2004.

THE GENETIC THEORY OF ADAPTATION: A BRIEF HISTORY. H. Allen Orr en *Nature Reviews Genetics*, vol. 6, n.º 2, págs. 119-127; febrero, 2005.

THE ORIGIN OF SPECIES. Charles Darwin. Dover Thrift Editions, 2006.

La selección de grupo

¿Dirige la selección natural la evolución en niveles superiores a los niveles de genes egoístas y los de individuos fértiles? **STEVE MIRSKY**

Si quiere promover un revuelo en una conferencia sobre evolución, mencione el concepto de selección de grupo, es decir, la idea de que una mezcla de individuos puede ser "seleccionada" como grupo frente a otros grupos heterogéneos de la misma especie. Los biólogos, que no dudarían en aunarse para combatir el creacionismo o el diseño inteligente, quizás empezarían una discusión acalorada para defender el principio de "cada uno por su lado".

Con todo, Charles Darwin argumentó a favor de la selección de grupo. Postuló que a los hombres con moralidad no tendría por qué irles mejor que a los inmorales, pero que las tribus de hombres morales tendrían seguramente "una inmensa ventaja" sobre las facciones de piratas. Sin embargo, en los años sesenta del siglo pasado, la selección a escala de grupo fue marginada. Según George Williams, teórico influyente, aunque la selección de grupo podría tener lugar, en la vida real no existen las adaptaciones relativas a los grupos. Richard Dawkins, de la Universidad de Cambridge, mantiene que la selección no alcanza ni siquiera el nivel biológico del individuo: opera sobre los genes; el individuo constituye un mero envoltorio de la selección de cientos de genes egoístas que intentan perpetuarse.

Sin embargo, en los últimos decenios la selección de grupo ha vuelto sigilosamente. Los teóricos evolutivos Edward O. Wilson, de la Universidad de Harvard, y David Sloan Wilson (no son parientes), de la Universidad de Binghamton, se proponen ofrecer argumentos sólidos a favor de la selección de grupo [*véase* "Evolución 'por el bien del grupo'", por David Sloan Wilson y Edward O. Wilson, en este mismo número]. La han denominado teoría de la selección multinivel: la selección actúa en múltiples niveles a la vez. Para averiguar cómo se suman todas esas acciones selectivas en cualquier circunstancia debe estudiarse caso por caso.

Los Wilson ofrecieron ciertas pautas en el número de diciembre de 2007 de la revista *Quarterly Review of Biology*: "la adaptación en un nivel requiere un proceso de selección natural en ese mismo nivel, y tiende a ser socavada por la selección natural en niveles inferiores".

Experimentos con grupos de organismos ilustran esa cuestión. La bacteria *Pseudomonas fluorescens* absorbe rápidamente el oxígeno disuelto en un medio líquido, dejando así una fina capa habitable cerca de la superficie. Sin embargo, algunas bacterias desarrollan espontáneamente una mutación beneficiosa. Esos individuos salvadores del grupo secretan un polímero que permite que grupos de individuos formen tapetes flotantes. Cuando forman los tapetes, todas las bacterias sobreviven, incluidas las que no gastan energía metabólica en producir el polímero. Pero si las bacterias "gorronas" se reproducen demasiado, los tapetes se hunden y mueren todas, las altruistas y las gorronas. Así, entre estas bacterias, los grupos que mantienen una proporción suficiente de altruistas como para flotar superarán a los grupos con un número de altruistas insuficiente. Los primeros sobreviven, crecen y se dividen en grupos hijos. Los individuos altruistas prosperan entonces, pese a la desventaja de gastar en la síntesis del polímero sus preciados recursos.

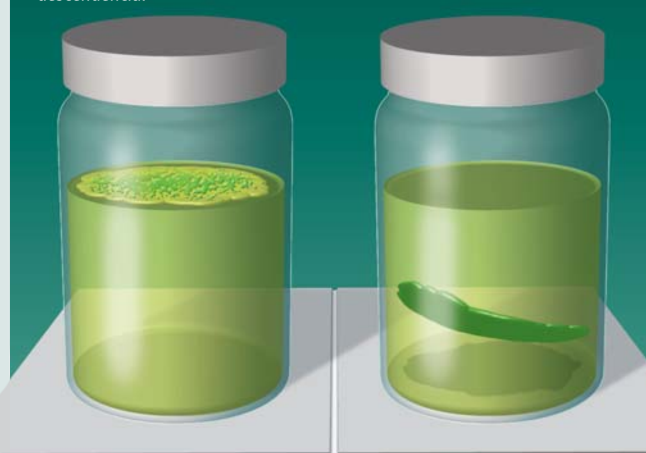
SELECCION INDIVIDUAL

Las bacterias "altruistas" de *Pseudomonas fluorescens* (*abajo, izquierda*) tienen un gen que les permite secretar un polímero que posibilita que los tapetes de bacterias floten y accedan al oxígeno. Las bacterias "gorronas" (*abajo, derecha*), en cambio, no portan el gen. La síntesis del polímero acarrea un coste energético adicional, por lo que las gorronas se reproducen a mayor velocidad que las altruistas. Si la selección natural actuara sólo sobre el individuo, las bacterias altruistas se extinguirían.



SELECCION DE GRUPO

Parece que opera también la selección de grupo (al menos en el laboratorio): favorece los tapetes de bacterias de *P. fluorescens* con individuos altruistas. Sólo los tapetes con un número suficiente de bacterias altruistas, que secretan el polímero, flotarán y, por tanto, podrán sobrevivir y reproducirse, incluidas las gorronas (*abajo, izquierda*). Los tapetes en los que la selección a nivel de individuo permita el crecimiento de muchas gorronas se hundirán, ahogando con ellas al resto de la colonia (*abajo, derecha*). Esos tapetes no dejarán descendencia.



TOMMY MOORMAN

El mayor cambio que la selección de grupo aporta a la teoría evolutiva es quizá su implicación en la selección familiar. Lo que parece selección de grupo podría en realidad entenderse como relaciones genéticas de parentesco. El evolucionista J. B. S Haldane explica de forma concisa la selección familiar: "Me sacrificaría por dos hermanos u ocho primos". Bajo esta perspectiva, las bacterias altruistas de los tapetes de *Pseudomonas* están salvando a sus parientes cercanos, con lo que aseguran la supervivencia de muchos de los genes que comparten con éstos.

Según Wilson, la selección familiar constituye un caso especial de selección de grupo: la importancia del parentesco es que incrementa la variación genética entre los grupos. Los individuos de un mismo grupo se parecen más entre sí que a los individuos de cualquier otro grupo. La diversidad entre los grupos ofrece opciones más claras para la selección de grupo. Las relaciones de parentesco acentúan la importancia de la selección en el nivel de grupo, en comparación con la selección individual dentro del grupo.

Los Wilson creen que los evolucionistas deben abrazar la selección multinivel para llevar a cabo investigaciones fructíferas en el campo de la sociobiología (el estudio del comportamiento social desde una perspectiva biológica). Resumen su hipótesis en una regla general: "El egoísmo vence al altruismo dentro del grupo. Los grupos altruistas vencen a los grupos egoístas."



DEL ATOMO AL CARACTER

Charles Darwin comprendió que, si había evolución, tenía que ser gracias a las variaciones aleatorias de los organismos. Hoy se está descubriendo de qué manera surge del ADN tal diversidad y la forma en que cambios moleculares resultan en nuevos organismos complejos e incluso en nuevas culturas • • • **DAVID M. KINGSLEY**

En un estante de una biblioteca pública de Texas hay un librillo verde, un ejemplar impreso hace 150 años de uno de los textos científicos más importantes que jamás se hayan escrito. Sin embargo, cuando ese ejemplar de la primera edición de *El origen de las especies* salió de tiros no era en absoluto evidente que fuese a tener semejante éxito. Tras terminar de corregir las pruebas, Charles Darwin escribió una lista breve de los colegas de fuste que deberían recibir ejemplares de cortesía antes de la publicación. Esperó ansioso el veredicto de los mayores pensadores de su época.

El científico más famoso de la Inglaterra de 1859 garabateó sus reacciones en las páginas de ese volumen verde que se conserva en la Universidad de Texas en Austin. Es el ejemplar que Darwin le envió, con la inscripción "Del autor" en el frontispicio, a Sir John Herschel, uno de sus héroes científicos, autor del tratado de filosofía natural que le atrajo al campo de la ciencia. En los años treinta del siglo XIX, Herschel había descrito de forma memorable el origen de las especies como el "misterio de los misterios", aunque fruto quizá sólo de procesos naturales. Darwin citaba las palabras de Herschel en el primer párrafo de ese libro donde ofrecía, a Herschel y al mundo, la ingeniosa resolución del "misterio de los misterios".

La teoría de Darwin era a la vez general y simple. Proponía que todos los seres vivos de la Tierra descendían de una o unas pocas formas originales. No pretendía saber de qué modo surgió la vida. Sin embargo, una vez hubo vida, aducía Darwin, los organismos debieron de empezar a cambiar lentamente y a diversificarse mediante un proceso natural: todos los seres vivos varían; las diferencias se heredan. Aquellos individuos cuyos rasgos o caracteres variantes son favorables en el ambiente donde habitan, medrarán y producirán más descendientes que los individuos con variantes desfavorables. Por lo tanto, los caracteres favorables se acumularán a lo largo del tiempo por un proceso inevitable de "selección natural".

Para convencer a los lectores del poder acumulativo de la variación espontánea y de la reproducción diferencial, Darwin indicaba los enormes cambios de tamaño y forma que habían tenido lugar en las plantas, las palomas y los animales domésticos tras unos cuantos siglos de mejora vegetal y animal por parte de los seres humanos.

Algunos de sus colegas captaron de inmediato la solidez de la argumentación de Darwin. "¡Qué estúpido he sido por no haber pensado en ello!", exclamó Thomas Henry Huxley, tras cerrar el ejemplar de prepublicación que le había remitido. Lamentablemente, la reacción del hombre cuya opinión Darwin decía que valoraba "casi más que la de cualquier otro ser humano" fue mucho menos favorable. Herschel no creía que pudieran surgir rasgos útiles nuevos y especies diferentes por simple variación aleatoria; denostó la idea como ley propia de la casa de tócame roque (*law of higgledy-piggledy*). En su ejemplar personal de *El origen de las especies*, Herschel señalaba que "primero tiene que producirse una variación favorable si es que se ha de lograr algo". Darwin no sabía nada acerca del origen de los rasgos variantes; Herschel creía que, si Darwin no podía explicar el origen de la variación, tampoco disponía de una teoría suficiente para dar cuenta del origen de las especies.

CONCEPTOS BASICOS

- La idea de que la naturaleza "selecciona" las variaciones favorables en los organismos era fundamental en la teoría de la evolución de Charles Darwin, pero en su época era un misterio la forma en que dichas variaciones surgían.
- Los cambios aleatorios del ADN pueden dar origen a cambios en las características de un organismo. Son, pues, una fuente constante de variación.
- Determinados tipos de cambios en el ADN pueden producir diferencias importantes en la forma y la función, espoleando así la evolución de nuevas especies e incluso de nuevas culturas humanas.

En los 150 años transcurridos desde la aparición de la teoría de Darwin, se han resuelto, gracias a un notable progreso en el estudio de genes y genomas, cuestiones clave relativas a los rasgos de los organismos: su transmisión a las generaciones siguientes y la forma en que experimentan el cambio evolutivo. Los científicos que hoy estudian la biología evolutiva conocen, al menos, los mecanismos moleculares básicos de la maravillosa diversidad de plantas y animales que nos rodea. Igual que la teoría misma de Darwin, las causas de la variación suelen ser simples; los efectos, de largo alcance. Y como corresponde, a ese conocimiento se ha llegado tras una serie de pasos, muchos de ellos dados en el momento justo para celebrar alguno de los sucesivos cincuentenarios del libro de Darwin.

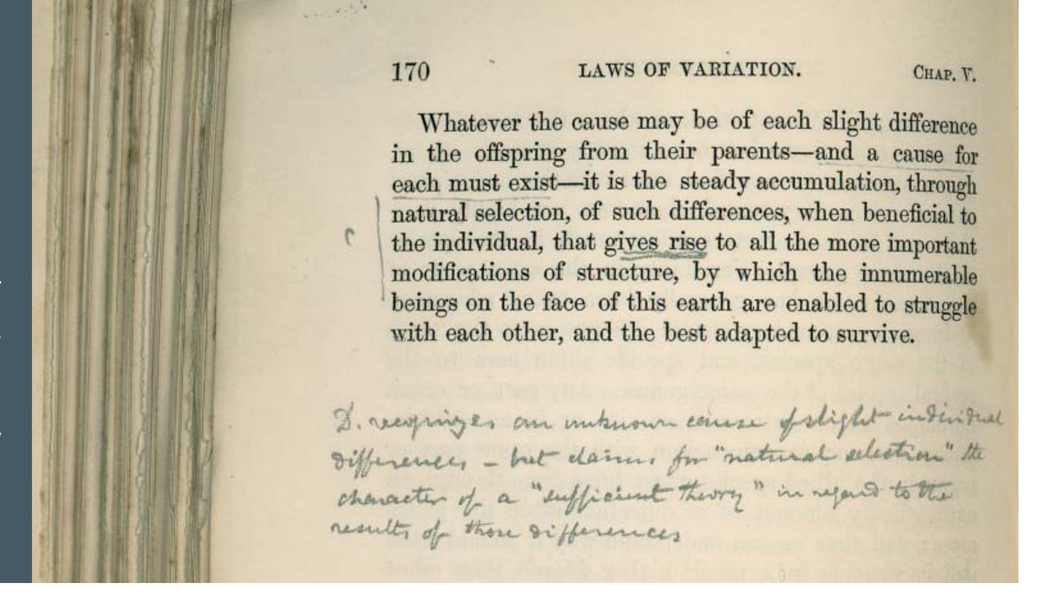
La variación, al descubierto

Darwin, incapaz de decir de dónde procedían las variantes, dejó sin explicar de qué manera los nuevos rasgos se difundían entre las generaciones siguientes. Darwin creía en la herencia mezclada: la descendencia adquiría características intermedias entre las de los progenitores. Pero reconocía la naturaleza problemática de esa tesis, pues si los rasgos se mezclaban, cualquier nueva variante rara se diluiría progresivamente, a lo largo de generaciones de cruzamiento sexual con la masa ingente de individuos que no portaran el carácter.

La confusión acerca de la herencia mezclada se despejó en 1900 con el redescubrimiento de los experimentos de Gregor Mendel sobre reproducción de los guisantes, realizados medio siglo antes, en los años cincuenta y sesenta. Diferentes plantas de guisante del huerto del monje checo mostraban diferencias morfológicas obvias, tales como tallos largos y cortos, semillas rugosas y lisas, etcétera. Cuando cruzaba plantas de guisante de razas de tipos opuestos, los descendientes se parecían, en general, a uno de los dos progenitores. Sin embargo, con cruzamientos ulteriores, ambas formas de un rasgo podían reaparecer de manera no diluida en generaciones futuras, lo que demostraba que la información genética asociada a las formas alternativas no había desaparecido tras la mezcla. Los experimentos de Mendel cambiaron la percepción general de las variantes heredables: de efímeras y mezclables pasaron a entidades discretas, presentes aunque no siempre visibles, que se transmitían de padres a hijos.

1. LA VARIACION, en las plantas de los guisantes y en cualquier forma de vida, procede del ADN.

AMADEO BACHAR


170 LAWS OF VARIATION. Chap. V.

Whatever the cause may be of each slight difference in the offspring from their parents—and a cause for each must exist—it is the steady accumulation, through natural selection, of such differences, when beneficial to the individual, that gives rise to all the more important modifications of structure, by which the innumerable beings on the face of this earth are enabled to struggle with each other, and the best adapted to survive.

D. recognizes an unknown cause of slight individual differences – but claims for "natural selection" the character of a "sufficient theory" in regard to the results of those differences

2. SIR JOHN HERSCHEL, científico eximio del tiempo de Darwin, cuestionaba la teoría que se planteaba en *El origen de las especies*. Puesto que el autor no podía explicar la causa de las variaciones de los caracteres, la idea de que la naturaleza seleccionaba las variantes ventajosas para conservarlas parecía incompleta. En su ejemplar del libro, Herschel escribió: "D. reconoce una causa desconocida de las ligeras diferencias individuales, pero afirma que la 'selección natural' tiene el carácter de una 'teoría suficiente' en lo que respecta a los resultados de dichas diferencias."

CORTESIA DEL CENTRO HARRY RANSOM, UNIVERSIDAD DE TEXAS EN AUSTIN (*libro*)

No tardó en observarse que los patrones de herencia de los "factores genéticos" de Mendel reflejaban el comportamiento de los cromosomas en el núcleo celular. En el quincuagésimo aniversario de *El origen de las especies* se desconocía todavía el origen de las variantes, pero la información genética se estaba convirtiendo en una entidad física, finalmente perceptible en hebras del interior del núcleo. Para el centenario de la publicación del libro, el rastro de la información hereditaria en los cromosomas había conducido hasta un macropolímero, el ácido desoxirribonucleico (ADN). James Watson y Francis Crick habían propuesto una estructura para la molécula de ADN en 1953, con implicaciones extraordinarias para nuestra comprensión física de la herencia y la variación.

El ADN es una larga hélice compuesta por dos hebras, con un espinazo formado por cadenas repetitivas de azúcar y fosfato. Las dos hebras del polímero se mantienen unidas por el emparejamiento complementario de cuatro bases químicas, adenina, citosina, guanina y timina (A, C, G, T); son éstas el fundamento de un lenguaje genético sencillo. Al igual que las 27 letras del alfabeto español, las cuatro letras químicas del alfabeto del ADN pueden disponerse en secuencias distintas a lo largo de una hebra de la hélice; las instrucciones que contengan serán también diferentes, y se transmitirán de padres a hijos.

La hélice de doble filamento proporciona un claro mecanismo para copiar información genética. C se empareja siempre con G; A, con T. Estas afinidades vienen determinadas por el tamaño, forma y propiedades de enlace de los correspondientes grupos químicos. Cuando se separan las dos hebras de la hélice de ADN, la secuencia de letras de cada filamento vale, pues, como molde para reconstruir la otra hebra.

La estructura del ADN de Watson y Crick hizo pensar inmediatamente en un posible fundamento físico de la variación espontánea. Los daños físicos o errores en la copia de la molécula de ADN producidos antes de la división celular alteraban la secuencia normal de letras. Las mutaciones tomaban formas muy dispares: sustitución de una letra por otra en una posición dada del polímero, supresión de un bloque de letras, duplicación o inserción de nuevas letras, o inversión y traslocación de las letras preexistentes. Tales cambios eran todavía teóricos por la época en la que se propuso la estructura. Pero a medida que se acercaba el sesquicentenario de la publicación de Darwin, los métodos de secuenciación a gran escala han ido haciendo posible la lectura de genomas enteros y el estudio de la variabilidad genética (la materia prima para el proceso evolutivo que propuso Darwin) con un detalle sin precedentes.

Mediante la secuenciación de diversos organismos y de su descendencia, y con la búsqueda subsiguiente de cambios espontáneos en la larga cadena de letras del ADN transmitida de una generación a la siguiente, se ha demostrado que las mutaciones se presentan con bastante regularidad. (Sólo las mutaciones que se producen en las células germinales se transmitirán a la descendencia y serán, por lo tanto, detectables de ese modo.) Aunque las tasas absolutas de mutación difieren de una especie a otra, en general y por término medio el ritmo a que suceden sustituciones de un solo par de bases es de 10^{-8} por nucleótido y por generación. Dicha frecuencia puede parecer baja, pero muchas plantas y animales poseen genomas muy grandes. En un animal pluricelular, con 100 millones o incluso 10.000 millones de pares de bases en su genoma, es probable que ocurran algunos cambios espontáneos de un solo par de bases cada vez que se transmite información hereditaria.

Algunos tipos de sustituciones son más probables que otros, en razón de la estabilidad química y de las propiedades estructurales de las bases del ADN. Además, ciertos tipos de cambios importantes de secuencia ocurren con frecuencia mucha mayor que la tasa promedio

El autor

David M. Kingsley enseña biología del desarrollo en la facultad de medicina de la Universidad de Stanford. Sus investigaciones sobre el control génico del desarrollo y mantenimiento de esqueletos y articulaciones elucidaron problemas de salud modernos y la evolución de nuevas formas animales.

global de las sustituciones de un solo par de bases. Pensemos en segmentos de ADN con ocho o más letras idénticas seguidas, los "homopolímeros", muy propensos a los errores de copia durante el proceso de replicación del ADN; inclinación que evidencian también los microsatélites, regiones constituidas por secuencias de dos, tres o más nucleótidos repetidas una y otra vez.

Todos estos cambios espontáneos dentro de los genomas resultan en una enorme diversidad, incluso dentro de una misma especie, sin excluir la nuestra. En 2003 se completó una secuencia de referencia, de tres mil millones de pares de bases, para el genoma humano. Fue un hito histórico. Cuatro años después se publicó el genoma casi completo de Watson, lo que permitió comparar dos secuencias humanas entre sí, y con una tercera, la de Craig Venter, fundador de Celera Genomics, del que también se ha hecho pública la secuencia del genoma. De la comparación de las tres secuencias, una junto a otra, emergen observaciones interesantes.

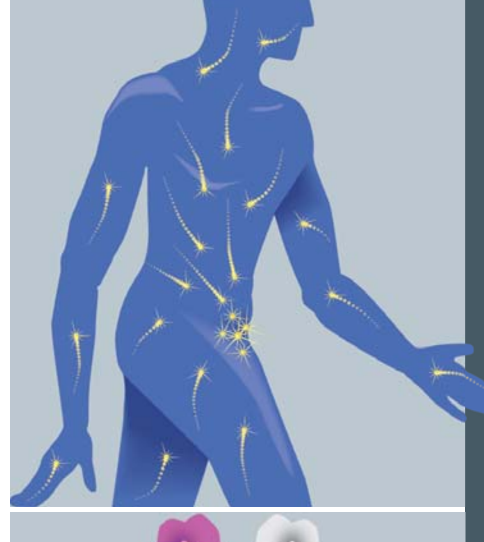
En primer lugar, el genoma de cada individuo difiere de la secuencia de referencia en aproximadamente 3,3 millones de cambios de un solo par de bases, lo que corresponde a un promedio de variación de una base por cada 1000. Las supresiones e inserciones de tramos de ADN mayores y de genes completos, aunque no son tan frecuentes como los cambios de un solo par de bases (unos cientos de miles, no los millones de casos por genoma), abarcan la mayoría de las bases que difieren entre los distintos genomas, con unos 15 millones de bases afectadas. Recientemente se ha descubierto también que unos individuos y otros cuentan con un número diferente de copias de muchas *regiones* enteras del genoma, dato que refleja un nivel insospechado de variación estructural del genoma cuyas consecuencias apenas se han empezado a explorar.

Por fin, esos cambios de secuencia que se descubren al comparar genomas humanos completos alteran o bien la codificación de proteínas, o bien la información reguladora, o bien el número de copias de una proporción sustancial de los 23.000 genes humanos, lo que proporciona una abundante fuente de posible variación para los muchos rasgos que difieren de una persona a otra.

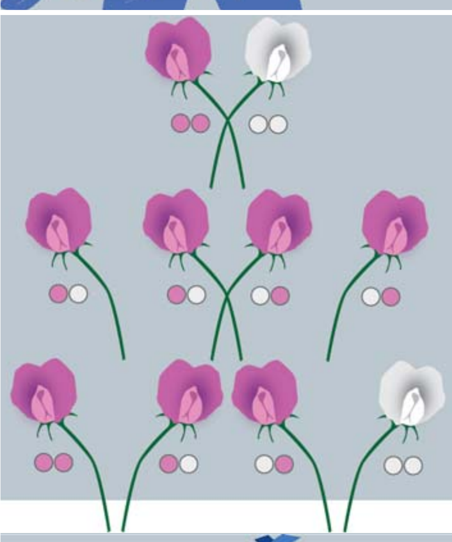
Base molecular de los caracteres

Herschel quería que se dijese cómo brotaban las variantes y por qué, antes de aceptar la teoría de Darwin, según la cual la selección natural opera sobre tales rasgos de los organismos y genera nuevas formas vivas mediante procesos íntegramente naturales.

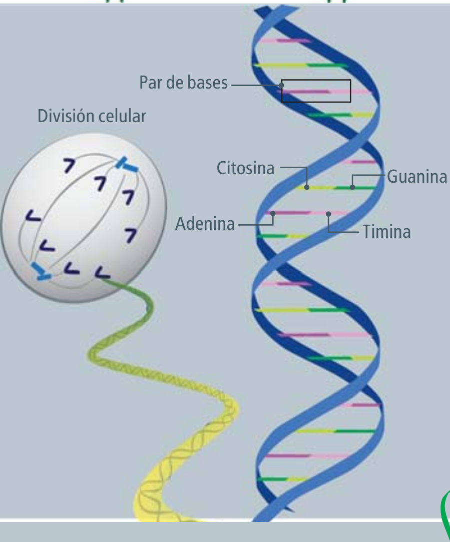
En busca de la variación



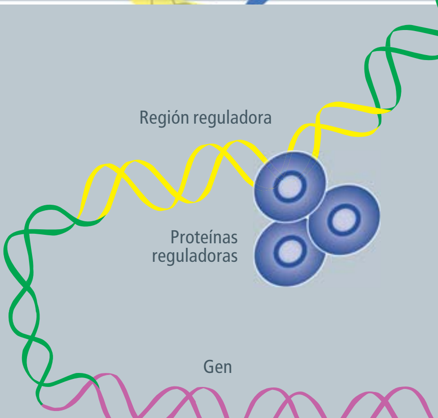
◀ GEMULAS: Nueve años después de *El origen de las especies*, Charles Darwin avanza la teoría de que una nueva variante de un rasgo podía transmitirse de padres a hijos y, por lo tanto, a la población en general, mediante partículas "infinitamente diminutas". Secretadas por las células, tales gémulas (así las llamó) transportarían la esencia de las partes del cuerpo de las que derivaban hasta los órganos reproductores, para su absorción por las células germinales.



◀ FACTORES MENDELIANOS: Los científicos de principios del siglo XX redescubrieron las ideas de Gregor Mendel, quien experimentó con plantas de guisante durante los años cincuenta y sesenta del siglo XIX y extrajo leyes de la herencia muy finas. Mendel conjeturó que existían factores discretos que portaban la información de los caracteres. Observó que cada individuo portaba dos copias (una procedente de cada progenitor) de un determinado factor. Aunque ambas copias se hallaban presentes, sólo una de ellas dominaba y producía el rasgo visible.



◀ LA DOBLE HELICE: En los días en que Francis Crick y James D. Watson descubrieron la estructura del ADN, en 1953, se conocía ya que la molécula vehiculaba la información correspondiente a los rasgos de los organismos. El par de hebras unidas mediante bases químicas complementarias sugería, a la vez, un alfabeto para transmitir el mensaje genético y un mecanismo para que éste cambiara. En cada ocasión en que una célula se divide, produce una copia de sus cromosomas, lo que supone una oportunidad de que se introduzcan errores "tipográficos" en la secuencia de bases.



◀ REGULACION GENICA: Los factores de Mendel terminaron por denominarse genes. Tradicionalmente se los define como segmentos de ADN que codifican una proteína. Los errores "tipográficos", o mutaciones, pueden alterar o incapacitar directamente a los genes, pero en el transcurso de los últimos diez años se ha llegado a apreciar la importancia de otra fuente de variación: las mutaciones que alteran una región del ADN responsable de regular cuándo y dónde se activa un gen en el cuerpo.

MELISSA THOMAS

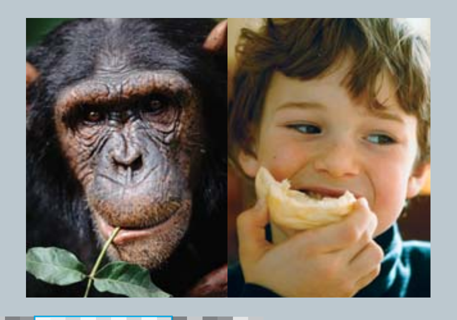
El origen de la variación

Los cambios aleatorios en el ADN de un organismo producen en ocasiones variaciones en sus caracteres, unas veces sutiles, otras espectaculares. La naturaleza de la mutación del ADN comprende desde una simple sustitución de un par de bases por otro hasta la duplicación de genes o de regiones cromosómicas enteras. Los ejemplos inferiores ilustran las diversas maneras en que las alteraciones espontáneas del ADN generan diversidad.



Mutación puntual
En los perros *whippet*, el cambio de un par de bases entraña la diferencia entre una silueta grácil y el animal corpulento de la derecha. La mutación inactiva el gen de una molécula señalizadora que regula el crecimiento muscular. En los animales con ambas copias del gen mutado, el crecimiento muscular se descontrola por la falta de una señal de "alto". Si se inhabilita una sola copia del gen, los perros son ligeramente más musculosos y se les aprecia como perros de carreras.

Inserción
En las plantas de guisante, una secuencia de 800 pares de bases insertada en un gen produce guisantes rugosos, no lisos. El elemento intruso del ADN inhabilita un gen necesario para la síntesis de almidón, con la alteración consiguiente del contenido en azúcar y agua de los guisantes. Elementos móviles de este tipo se ven en el genoma de la mayoría de los organismos pluricelulares, hombre incluido.



Número de copias de un gen
Genes enteros pueden duplicarse al errar el proceso de copia durante la división celular, lo que conduce a diferencias entre especies y a variación entre miembros de una misma especie. En los chimpancés, que se alimentan sobre todo de plantas verdes, el genoma contiene en condiciones normales un gen para la enzima que digiere el almidón, la amilasa salival, mientras que el hombre porta de dos a 10 copias del gen.

WALLY EBERHART (*guisantes*); ZUMA LIVE/NEWSCOM (*whippet mutado*); TRACY MORGAN (*whippet pequeño*); FRANS LANTING *Corbis* (*chimpancé*); ALTRENDO IMAGES (*niño*)

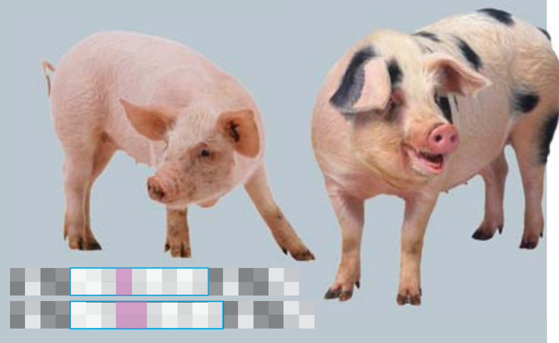
Sabemos ahora que los cambios espontáneos en el ADN son los "porqués" de las variaciones. La cuestión del "cómo" se traducen esas mutaciones en diferencias en los rasgos, más compleja, exige un campo de investigación activo, con derivaciones que trascienden el estudio evolutivo.

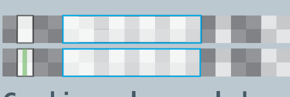
En la actualidad, se puede a menudo trazar de arriba abajo el camino que va de los caracteres morfológicos y fisiológicos clásicos de plantas y animales con cambios específicos a los átomos de la doble hélice del ADN. Se sabe, por ejemplo, que las plantas de guisante altas y bajas de Mendel difieren por una simple sustitución de G por A en un gen para la enzima giberelinoxidasa. La llamada variante corta del gen cambia un aminoácido en la enzima, lo que reduce la actividad catalítica y causa un descenso del 95 por ciento en la producción de una hormona estimuladora del crecimiento en los tallos de las plantas de guisante.

En cambio, el rasgo de semilla rugosa de Mendel resulta de la inserción de una secuencia de 800 pares de bases en el gen de una enzima relacionada con el almidón. La secuencia insertada, al entorpecer la síntesis de la enzima, reduce la de almidón, y los cambios que produce en el contenido en azúcar y agua llevan a semillas más dulces, pero rugosas. La secuencia insertada aparece, asimismo, en múltiples puntos más del genoma del guisante, y presenta todas las características de un elemento transponible (bloque de código de ADN que va de un lugar a otro del genoma). Estos transposones pudieran constituir muy bien otra fuente común de nuevas variantes genéticas, ya sea por inactivación de genes o por la creación de nuevas secuencias reguladoras que cambien los patrones de la actividad génica.

Son pocas las generalizaciones sobre la naturaleza de la variación permitidas a los biólogos evolutivos. Reza una de ellas que rara vez se puede saber, a partir de la observación, cuál es la fuente genética de un rasgo variante. Darwin escribió mucho acerca de las espectaculares diferencias morfológicas presentes en palomas, perros y otros animales domésticos. En la actualidad sabemos que los rasgos interesantes de los animales domésticos se basan en muchos tipos de cambios en la secuencia del ADN.

A modo de botón de muestra: las diferencias entre el color negro y amarillo en los *retrievers* de Labrador surgen de un cambio de base que inactiva un receptor de señales en las células pigmentarias de los perros amarillos. El tamaño muscular aumentado y el rendimiento





Duplicación

Las secuencias que contienen el mismo par de bases repetido ocho o más veces, denominadas homopolímeros, son muy propensas a errores de copia. En los cerdos, la obtención de dos C-G adicionales en una secuencia de este tipo inactiva un gen para un receptor de señales en las células pigmentarias, lo que produce pelajes de color claro. Los errores de copia dentro de células concretas pueden causar que la secuencia duplicada pierda bases, restableciendo la función del gen y produciendo manchas oscuras en el cuerpo.





Cambios en los reguladores

Las mutaciones en el ADN que controla cuándo y dónde se activan los genes pueden producir profundos cambios en ciertos rasgos, ya que alteran la formación de partes enteras del cuerpo durante el desarrollo del organismo. Cambios en las regiones reguladoras de un solo gen que controla pautas de la división celular durante el desarrollo del tallo son la causa de muchas de las diferencias entre un teocinte arbustivo (*arriba*) y el erguido maíz de hoy.

BILL LING (*cerdo*); PETER ANDERSON (*cerdo moteado*); JERRY FRIEDMAN *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported* (*teocinte*); PAUL DAMIEN *National Geographic* (*maíz*); MICHAEL SHAPIRO, PAMELA COLOSIMO, FRANK CHAN, CRAIG MILLER Y DAVID M. KINGSLEY *Stanford University* (*espinoso*)

mejorado en las carreras de los perros *whippet* se han atribuido a otro cambio en un par de bases, que inactiva la señal que, en condiciones normales, suprime el crecimiento muscular. Sin embargo, la singular cresta de pelo dorsal de los perros *Rhodesian ridgeback* procede de la duplicación de una región de 133.000 pares de bases que contiene tres genes determinantes de un factor de crecimiento para las células fibroblásticas. La duplicación intensifica la síntesis de dicha proteína.

Los críticos actuales de Darwin y de la teoría de la evolución han sugerido a menudo que pequeñas diferencias entre individuos, como las mencionadas, podrían surgir por procesos naturales, pero no diferencias estructurales entre especies, de mayor calado. Sabemos, sin embargo, que ciertos genes ejercen potentes efectos sobre la proliferación y la diferenciación celulares durante el desarrollo embrionario; sabemos también que los cambios operados en estos genes de control comportan cambios espectaculares en el tamaño, forma y número de partes del cuerpo. La biología evolutiva del desarrollo (*evo-devo*), subespecialidad de la biología evolutiva, se ocupa del estudio del efecto de los cambios en genes importantes del desarrollo y en el papel que desempeñan en la evolución.

Sobre la influencia poderosa de los genes en cuestión nos aporta una ilustración clara el maíz. La planta actual tiene un aspecto completamente distinto del que presentaba su antepasado silvestre, una mala hierba de América Central, el teocinte (o teosinte). Muchas de las principales diferencias estructurales entre el maíz y el teocinte proceden de regiones cromosómicas clave, muy pocas. Las mutaciones en un área reguladora del gen que controla los patrones de la división celular durante el desarrollo del tallo explican en buena medida la diferencia entre una forma arbustiva general y un solo tallo central. Los cambios en un segundo gen, activo durante el desarrollo de la semilla, ayudan a transformar las semillas pétreas y embutidas en mineral del teocinte en los granos más blandos y expuestos del maíz.

Los agricultores mesoamericanos de la antigüedad obtuvieron maíz a partir del teocinte. No conocían el ADN, ni la genética, ni la biología del desarrollo. Pero al cruzar plantas con las propiedades deseadas, seleccionaron inadvertidamente variantes espontáneas de genes controladores del desarrollo fundamentales, y con ello convirtieron, en no muchos pasos, una mala hierba arbustiva en una planta de aspecto completamente distinto y útil para el consumo.

Principios similares subyacen a la evolución de nuevas formas corporales en poblaciones salvajes de espinosos. Cuando la última Edad del Hielo terminó hace 10.000 años, poblaciones migradoras de peces oceánicos colonizaron innumerables lagos y ríos recientes de Norteamérica, Europa y Asia. Desde entonces, las poblaciones han dispuesto de unas 10.000 generaciones para adaptarse a nuevas fuentes de alimento, nuevos depredadores y nuevos colores, temperaturas y concentraciones salinas del agua que se han encontrado en los ambientes dulceacuícolas. Hoy en día, muchas especies de espinosos de agua dulce muestran diferencias estructurales mayores que las que se ven entre distintos géneros de peces; por citar algunas: cambios (de hasta 30 veces) en el número o tamaño de sus placas óseas, presencia o ausencia de aletas enteras y cambios importantes en la forma de la mandíbula y el cuerpo, las estructuras dentarias, las espinas defensivas y el color del cuerpo.

Al igual que ocurre con el maíz, la investigación genética nos demuestra que algunos cambios morfológicos grandes pueden adjudicarse a unas pocas regiones cromosómicas importantes. Y resulta que los genes clave de dichas regiones codifican reguladores básicos del desarrollo; así, una molécula señalizadora que controla la formación de muchas estructuras superficiales distintas, otra molécula

ADAPTACIONES DEL ESPINOSO

En 10.000 generaciones, la evolución del espinoso ha generado miríadas de formas para ajustarse a ambientes distintos. Mutaciones que afectan a la actividad de tres genes que intervienen en el control del desarrollo han producido asombrosos cambios anatómicos, entre ellos la pérdida de las aletas pélvicas posteriores, grandes diferencias en la estructura ósea y un color mucho más desvaído. En cada pareja de peces mostrada aquí, se ve un antepasado marino típico y, bajo el mismo, un espinoso de agua dulce evolucionado.

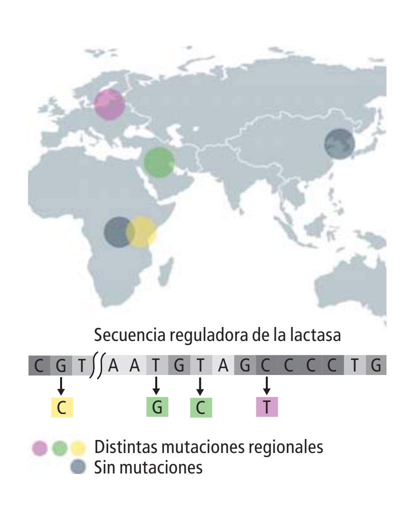


Mutaciones y cultura

Basta que el hombre se mire en su propio genoma para descubrir ejemplos sorprendentes de variaciones recientes que han producido rasgos nuevos: resistencia a enfermedades, color de la piel y un largo etcétera. En el caso de algunas adaptaciones a la dieta, los cambios permitieron que poblaciones enteras adoptaran nuevas formas de vida, como la ganadería y la agricultura. Se ha descubierto que un ejemplo de un rasgo de este tipo, la capacidad de digerir leche en la edad adulta, ha surgido de manera independiente en grupos de continentes diferentes, lo que atestigua la gran ventaja nutritiva que la variante proporciona y la posibilidad de conectar cambios sencillos en la secuencia de ADN a la evolución cultural humana.

Tolerancia a la lactosa

Una enzima, la lactasa, producida en los intestinos, permite a infantes y niños digerir la lactosa, el complejo azúcar de la leche. Aún hoy, sólo una minoría de los humanos continúa produciendo lactasa cuando son adultos. En 2002 se descubrió que en los europeos esta capacidad se debía a una mutación en el ADN regulador que controla el gen de la lactasa. Más recientemente, se ha encontrado que varias mutaciones diferentes que afectan al mismo gen predominan en poblaciones de Africa Oriental y Arabia Saudí que pastorean animales productores de leche. Los cambios en el ADN indican que el rasgo variante de la tolerancia a la lactosa ha surgido muchas veces de manera independiente en los últimos 9000 años. La conservación del carácter en sociedades lactodependientes revela de qué forma la cultura puede consolidar las fuerzas de la evolución.



3. DIFERENTES MUTACIONES de una misma región reguladora en el ADN, que se encarga del control del gen de la lactasa, predominan en distintas partes del mundo.

que activa baterías de genes implicados en el desarrollo de las extremidades y un factor de células madre secretado que controla la migración y proliferación de células precursoras durante el desarrollo embrionario.

La evolución general de nuevas y diversas formas de espinosos implica genes múltiples. No obstante, se han visto repetidamente algunas de las mismas variantes, en particular reguladores del desarrollo, en poblaciones independientes. La adaptación de estos peces a sus ambientes respectivos demuestra de forma elegante que las adaptaciones aleatorias pueden dar origen a diferencias sustantivas entre organismos. Si los cambios operados confieren ventaja, la selección natural los conservará, una y otra vez.

El concurso casual de los átomos

El hombre puede también mirarse al espejo y ver más ejemplos de variaciones relativamente recientes que la selección natural ha conservado. Los humanos presentamos diversidad de colores en los diferentes ambientes del planeta; hace poco, los tonos más pálidos de la piel de las poblaciones de latitudes septentrionales se han atribuido a los efectos combinados de varios cambios genéticos, entre ellos mutaciones de bases concretas en los genes de un receptor de señales y de una proteína de transporte activa en las células pigmentarias. Se sospechan asimismo cambios adicionales en el ADN que regula la migración, proliferación y supervivencia de las células pigmentarias incipientes.

Una relativa falta de variación en las regiones del ADN adyacentes a estos dos genes de los pigmentos sugiere que las variantes de piel clara fueron inicialmente raras y probablemente se originaron en un número restringido de personas. Después, las variantes habrían aumentado rápidamente de frecuencia a medida que los humanos emigraron hacia ambientes nuevos con temperaturas más frías y a latitudes más altas, en las que la piel clara produce más fácilmente vitamina D a partir de una radiación solar limitada.

De forma parecida, se han encontrado fuertes "rúbricas de selección" moleculares alrededor de un gen que controla la capacidad de digerir lactosa, el azúcar predominante en la leche. Los humanos son mamíferos, amamantan a sus pequeños y producen una

STEFAN BECKER (*pastor con vacas*); MELISSA THOMAS (*mapa*)



Color de la piel
Se han relacionado cambios en al menos tres genes con el carácter de piel de color claro, del que se cree que surgió en Europa septentrional. La piel clara absorbe mejor la radiación ultravioleta necesaria para generar vitamina D, una ventaja allí donde escasea la radiación solar.



Digestión del almidón
De unas personas a otras varía el número de copias del gen de una enzima que digiere el almidón, la amilasa salival. Los miembros de culturas con dietas ricas en almidón tienden a poseer un número mayor de copias del gen de la amilasa y niveles más altos de la enzima en su saliva.

PATRIK GIARDINO CORBIS (*arriba*); TRAVEL INK (*abajo*)

enzima intestinal que degrada la lactosa en los azúcares glucosa y galactosa, más sencillos. Constituimos, además, una excepción entre los mamíferos: dejada atrás la lactancia, seguimos utilizando la leche de otros animales como fuente importante de alimentación. Esta innovación cultural ha ocurrido de manera independiente en grupos de Europa, Africa y Oriente Medio, que beben leche obtenida de vacas, cabras y camellas.

La capacidad de digerir leche en la edad adulta depende de una forma mutante del gen de la lactasa intestinal, que en la mayoría de los mamíferos y en la mayoría de los grupos humanos sólo se muestra operativo durante el período de amamantamiento. Sin embargo, una forma mutante del gen de la lactasa persiste activa en los adultos de poblaciones con una larga historia de pastoreo de animales productores de leche. Si bien tal innovación genética se ha relacionado con cambios de un solo par de bases en las regiones reguladoras del ADN que controlan el gen, observamos que diferentes poblaciones tolerantes a la lactosa poseen diferentes mutaciones en la región clave. Encontramos aquí un ejemplo espectacular de la evolución repetida de un carácter similar mediante cambios independientes que afectan a un gen.

Otro ejemplo de una adaptación reciente relacionada con la nutrición en los seres humanos implica la multiplicación de un gen completo. Mientras que los chimpancés no poseen más que una copia del gen para la amilasa salival, una enzima que digiere el almidón del alimento, el hombre muestra una notable variación en el número de copias del gen de la amilasa. En algunos individuos, las duplicaciones del gen han producido hasta 10 copias a lo largo de un solo cromosoma. Las personas de culturas que consumen dietas ricas en almidón, como el arroz, tienen un número medio superior de copias del gen de la amilasa y niveles superiores de la enzima amilasa en su saliva en comparación con las personas de culturas basadas en la caza o la pesca.

La ganadería de animales productores leche y la agricultura aparecieron en los últimos 10.000 años. Aunque esto corresponde sólo a unas 400 generaciones humanas, es evidente que esas nuevas fuentes de alimentación condujeron a la acumulación de variantes genéticas novedosas en las poblaciones que las explotaban.

La objeción más tenaz de Herschel a la teoría de Darwin expresaba su sensación de que nunca podrían surgir rasgos nuevos y útiles a través de una variabilidad aleatoria simple. En comentarios publicados y en cartas argumentaba que dichas características siempre requerirían "mente, plan, diseño, con la exclusión lisa y llana del azar como sujeto y del concurso casual de los átomos". A Herschel le sobraba razón cuando señalaba que el origen de la variabilidad era todavía un misterio en 1859. Sin embargo, después de 150 años de investigación, podemos ya catalogar diversas variantes espontáneas en la secuencia del ADN que ocurren cada vez que un genoma complejo se transmite de padres a hijos.

Sólo una minúscula fracción de dichos cambios tiene probabilidades de mejorar la información hereditaria original y el carácter que de ella deriva, no de degradarlos. Con todo, los guisantes más dulces, los músculos mayores, la capacidad de correr más célere o la de digerir nuevos alimentos han surgido de disposiciones nuevas y sencillas en la secuencia del ADN de guisantes, perros y humanos. Así, el "concurso casual de los átomos" puede generar rasgos inéditos e interesantes. Y la variabilidad intrínseca de los seres vivos sigue proporcionando la materia prima gracias a la que, en las famosas palabras del final del librillo verde de Darwin, "un sinfín de formas maravillosas y bellísimas nació, y nace, por evolución".

Bibliografía complementaria

PARALLEL GENETIC ORIGINS OF PELVIC REDUCTION IN VERTEBRATES. Michael D. Shapiro, Michael A. Bell y David M. Kingsley en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 103, n.º 37, págs. 13.753-13.758; 12 septiembre, 2006.

INDEPENDENT INTRODUCTION OF TWO LACTASE-PERSISTENCE ALLELES INTO HUMAN POPULATIONS REFLECTS DIFFERENT HISTORY OF ADAPTATION TO MILK CULTURE. Nabil S. Enattah *et al.* en *American Journal of Human Genetics*, vol. 82, n.º 1, págs. 57-72; 2008.

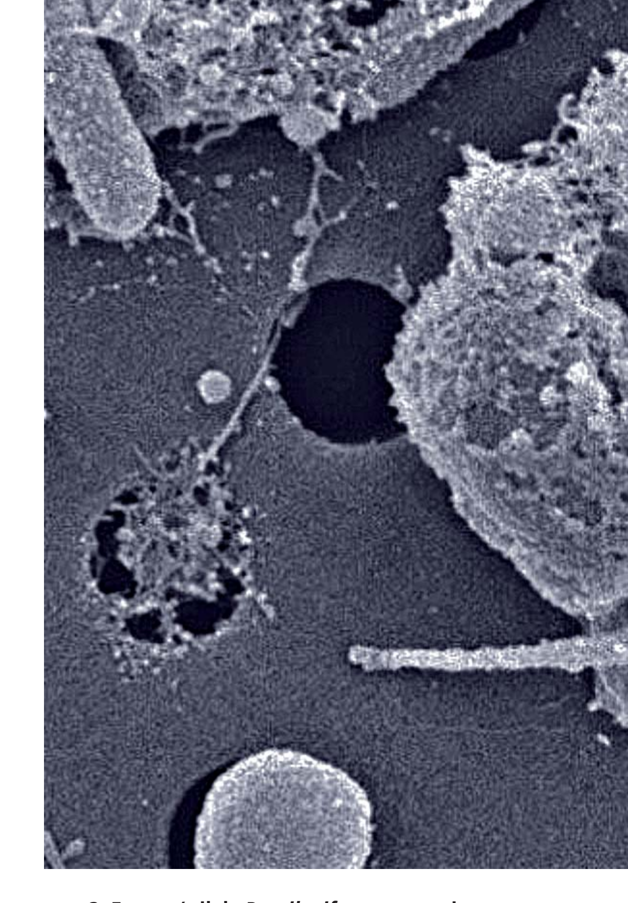
EVOLUTION: CONSTANT CHANGE AND COMMON THREADS. HHMI 2005 HOLIDAY LECTURES ON SCIENCE. David M. Kingsley y Sean B. Carroll. Disponible en www.hhml.org/biointeractive/evolution

Un parásito amigable

Rosa Isabel Figueroa y Esther Garcés

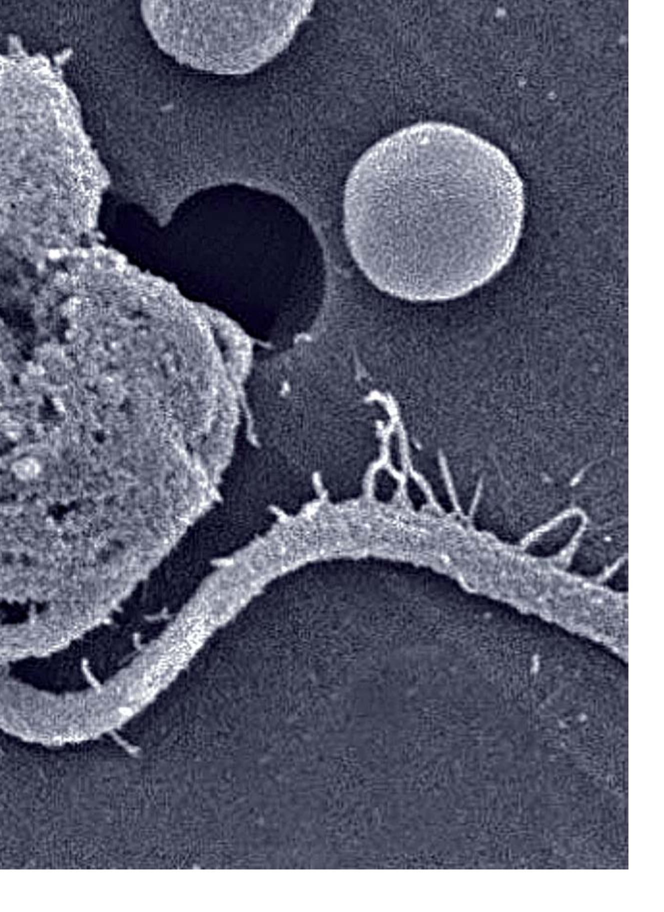
La imagen que tenemos de los parásitos no suele ser muy positiva. Les acusamos de vivir a costa de otros, causando perjuicio a quien los padece. Ciertamente, viven y se nutren a expensas del parasitado, sin aportarle ningún beneficio. Pero no siempre resultan perjudiciales: los hay que favorecen a un tercer organismo. Tal acontece con *Parvilucifera*, un parásito de las algas tóxicas (dinoflagelados) causantes de las "mareas rojas". Las proliferaciones de estas algas provocan en el sector marisquero y acuícola efectos desastrosos; por una razón obvia: el consumo de pescado y marisco portador de toxinas algales puede acarrear graves problemas sanitarios.

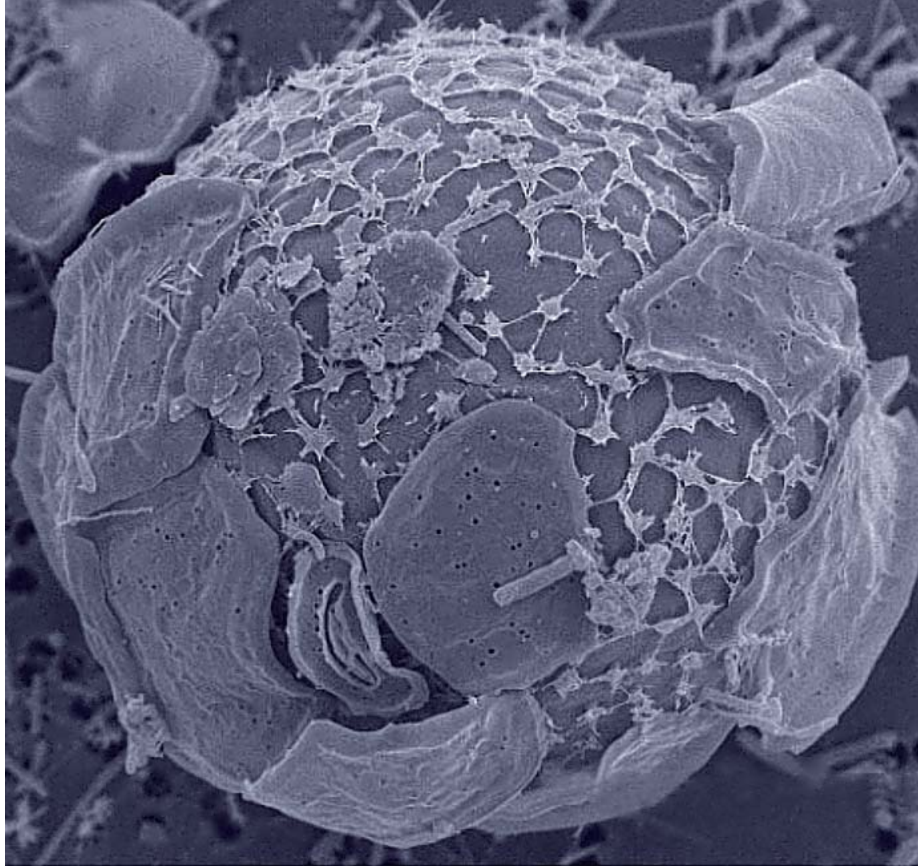
Aunque se ha ensayado la aplicación de este organismo en la lucha contra las proliferaciones algales nocivas, las seguimos padeciendo. ¿Por qué? Las algas han desarrollado mecanismos de defensa: quistes resistentes o bien cepas de algas resistentes (un fenómeno similar al de la adquisición de resistencia bacteriana ante los antibióticos). El ciclo biológico de este parásito consta de dos estados: una fase móvil y una fase no móvil (espora). Un estudio profundo de este ciclo resulta esencial para conocer sus aplicaciones.



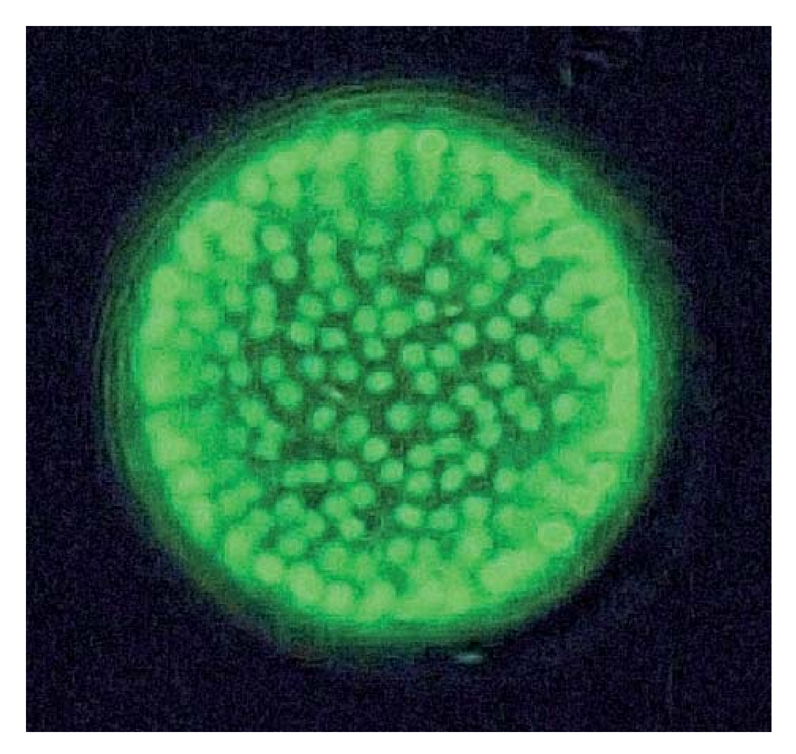
2. Fase móvil de *Parvilucifera*, en esta imagen obtenida por microscopía electrónica. Mide menos de 3 micrometros de longitud y unos 2 micrometros de ancho; posee dos flagelos, uno desnudo y otro cubierto de pelos.

1. Enormes proliferaciones de fitoplancton en el mar Negro.



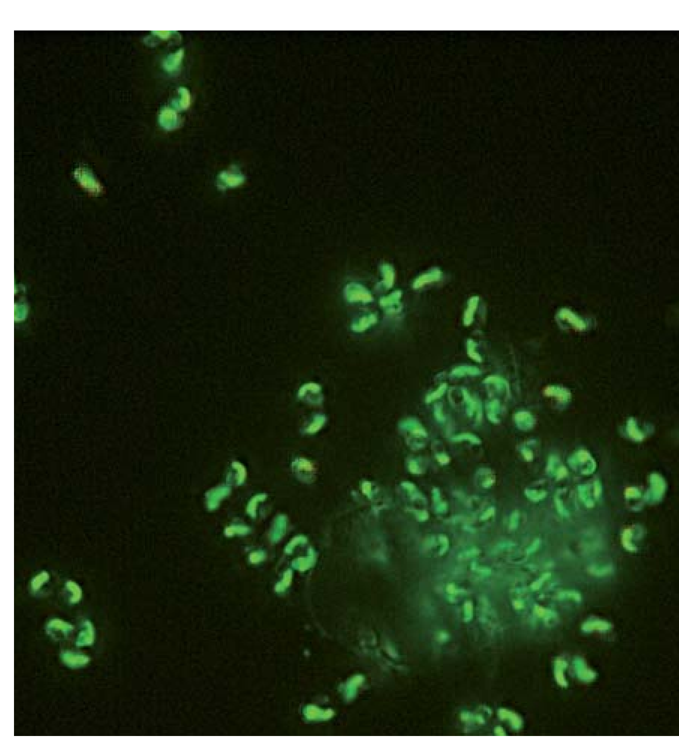


3. Fase no móvil de *Parvilucifera*, en imagen obtenida por microscopía electrónica. El parásito penetra en el alga; prolifera en el citoplasma o bien en el núcleo, según la especie infectada. Conforme avanza la infección, el cuerpo del dinoflagelado se llena de parásitos dando lugar a una espora oscura y redondeada.



4. En el interior de la espora distinguimos, tras tinción de ADN, de 50 a 500 parásitos (*verde*).

JEFF SCHMALTZ/NASA (*imagen de satélite del mar Negro*)



5. Pasados uno o dos días, la espora libera los parásitos, que infectarán a una nueva alga.

Francisco J. Ayala: La evolución del cristiano

Francisco J. Ayala, genetista que fuera dominico, no ve ningún conflicto entre el darwinismo y la fe. El reto estriba en convencer a un extenso sector del público estadounidense

Sally Lehrman

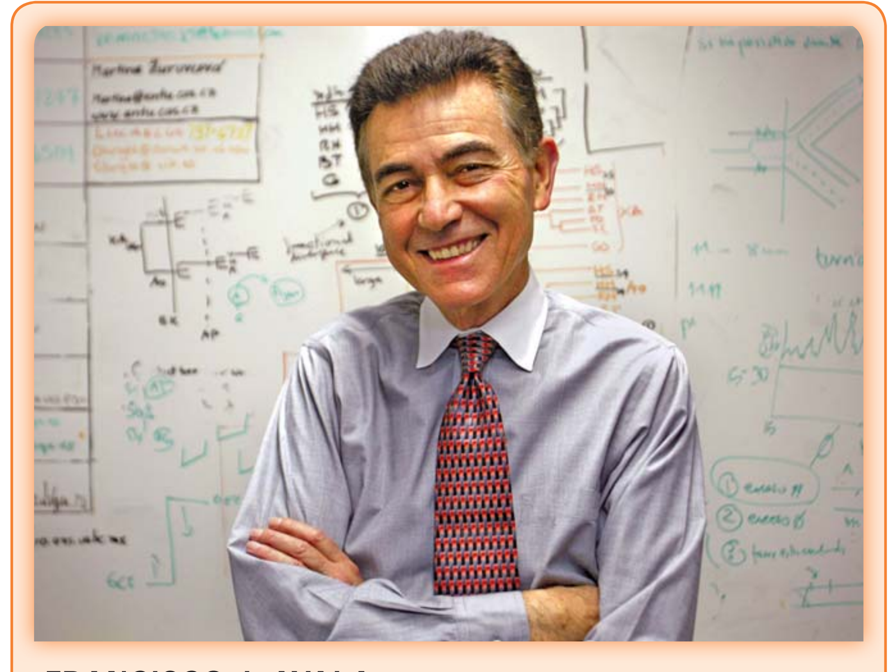
Francisco J. Ayala abre el cajón más alto de un archivador negro y rebusca entre una docena de carpetas, todas clasificadas con pulcritud por publicación y fecha. Son los ensayos sobre la evolución que ha compuesto en las últimas seis u ocho semanas para libros y revistas de divulgación. “Trabajos a destajo”, dice con una sonrisa, ufanándose de que sólo le lleva un día o dos escribirlos.

Tras casi 40 años tratando de difundir la evolución entre los cristianos, este prestigioso biólogo evolutivo de la Universidad de California en Irvine ha refinado primorosamente sus argumentos. Dispone de anécdotas y ejemplos a raudales, e incluso tiene a punto alguna provocación. Uno de cada cinco embarazos, les recuerda a menudo a sus oyentes, acaba en aborto espontáneo. Y a continuación pregunta retóricamente, como hizo en una entrevista que concedió a la revista *U.S. Catholic* el año pasado: “Si Dios diseñó explícitamente el sistema reproductor humano, ¿es Dios el mayor abortista de todos?” Con esos ejemplos, explica, “pretendo darles la vuelta a sus argumentos”.

Ayala, a sus 74 años, está preparándose para un 2009 que se presagia excepcionalmente atareado. Ese año se celebra el bicentenario del nacimiento de Charles Darwin y el sesquicentenario de la publicación de “El origen de las especies”, y es de prever que se enardezca el debate entre evolucionistas y creacionistas. Ayala dice que para los científicos es apremiante la necesidad de entablar un diálogo con los creyentes. Como prueba, blande un tomo de tamaño A3 que pesa sus buenos cinco kilos. Se titula *Atlas of Creation*. El creacionista musulmán Adnan Oktar, turco, se lo ha enviado por correo a científicos y museos a lo largo y ancho de Estados Unidos y Francia. Este volumen, magníficamente ilustrado, no sólo ataca la evolución, sino que relaciona la teoría de Darwin con diversos horrores, desde el fascismo hasta el mismísimo Satanás.

En los Estados Unidos, el Instituto Discovery de Seattle, que promueve el diseño inteligente, ha publicado libros de texto de biología en los que se pone en entredicho la evolución, y en 2008 ha promocionado la película *Expelled: No intelligence allowed* [Expulsado: la inteligencia no está permitida], en la que se sostiene que los científicos antidarwinistas son perseguidos. La candidata republicana a la vicepresidencia de la nación, Sarah Palin, sostuvo que el creacionismo debería enseñarse a la par que la evolución en las escuelas. Uno de cada ocho profesores de enseñanza secundaria propone el creacionismo como una alternativa válida, según una encuesta de la Universidad estatal de Pennsylvania. A pesar de los abnegados esfuerzos de los científicos, y a pesar de algunos considerandos constitucionales, los creacionistas y los defensores del diseño inteligente “no se muestran menos débiles”, dice Ayala. “Al contrario, se los ve más cada día”.

Pero Ayala sostiene que los científicos que atacan la religión y ponen en ridículo a los creyentes —entre quienes sobresale Richard Dawkins, de la Universidad de Oxford— cometen un error. Amén de destructivo, da pábulo a quie-



UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN IRVINE

FRANCISCO J. AYALA

CONCEPTOS COMPATIBLES: En el tiempo que pasó en la facultad de teología de los dominicos de Salamanca, nunca percibió que la evolución fuera un enemigo. Muy al contrario, sostiene que el darwinismo resuelve en el cristianismo la paradoja de que un Creador suma bondad pueda permitir el sufrimiento y el mal.

PLUMA PROLIFICA: Lleva publicados unos 900 artículos, ha escrito o editado 32 libros y ganado varios premios, entre ellos la Medalla Nacional de la Ciencia de Estados Unidos en 2001.

RAMIFICACIONES: Aplica sus conocimientos de genética a cultivar 30 variedades de uva vinícola en unas 1000 hectáreas de Lodi (California).

nes predican que hay que escoger entre Darwin y Dios. Con frecuencia, los alumnos del curso de introducción a la biología que dicta Ayala le dicen que contestarán las preguntas de los exámenes como él quiera, pero que en el fondo rechazan la evolución, a causa de sus creencias cristianas. Luego, un par de años más tarde, cuando han aprendido algo de ciencia, deciden abandonar la religión. Una y otra, parecen pensar, son incompatibles.

Declaración que a Ayala le produce tristeza. Le gustaría que los creyentes supieran compatibilizar la fe y la ciencia. Con la experiencia de sus cinco años de estudio de teología preparándose para la ordenación como sacerdote dominico, Ayala se sirve de la evolución para tratar de resolver una paradoja central del cristianismo, a saber, cómo es posible que un Dios omnisciente y suma bondad permita el mal y el sufrimiento.

La naturaleza está diseñada de modo imperfecto, con rarezas como el punto ciego del ojo humano o un exceso de dientes que se apretujan en nuestras mandíbulas. Los parásitos son sádicos; crueles, los depredadores. La selección natural puede explicar la ferocidad de la naturaleza, razona Ayala, y despejar el "mal" (un acto intencionado de la libre voluntad) del reino viviente. "Darwin resolvió el problema", concluye. Se remite a teólogos cristianos con cultura científica que entienden que Dios está continuamente implicado en el proceso creativo mediante la selección natural no dirigida. Ayala se propone ofrecer a los creyentes una respuesta mejor que el creacionismo o el diseño inteligente, hablándoles en sus propios términos.

Ayala tiende puentes entre ciencia y religión porque habla con la mayor soltura (y un marcado acento castellano) los lenguajes de la una y de la otra. A pesar de su prolífica actividad de divulgador, a veces agotadora, sigue a la última en biología molecular. Al igual que en sus debates teológicos, gusta de poner en tela de juicio las ideas científicas que se dan por ciertas. Fue pionero en poner de manifiesto, al principio de su carrera científica, lo extensa que era la variabilidad genética y la acción de la selección natural en el plano de las proteínas. Sus mediciones llevaron a cambios de calado en la teoría del "reloj molecular" uniforme, que se basa en las diferencias en la estructura de las proteínas o en el ADN para establecer el momento en que las especies divergieron de un ancestro común. Ya no dirige un laboratorio, pero sigue colaborando asiduamente.

Ayala se licenció en física en la Universidad Complutense de Madrid, y luego trabajó en un laboratorio de genética mientras estudiaba teología en la Facultad Pontificia de San Esteban, en Salamanca. Cuando se ordenó en 1960 ya había decidido seguir una carrera científica, en vez de dedicarse por entero a su ministerio. En aquel convento dominicano nunca se percibió a Darwin como enemigo de la fe cristiana. De modo que, cuando llegó a Nueva York un año después para hacer un doctorado en genética, la opinión generalizada en los Estados Unidos de la hostilidad entre evolución y la religión le cogió por sorpresa.

Frente a quienes declaran que la fe es incompatible con la ciencia, Ayala quiere que los creyentes vean en la evolución una aliada.

Desde entonces, Ayala ha intentado contrarrestar el escepticismo respecto a las teorías de Darwin sostenido sobre presupuestos religiosos. Al principio, recuerda, sus colegas científicos recelaban, y eran de la opinión de que los investigadores no debían enzarzarse en diatribas religiosas. En 1981, cuando el legislativo de Arkansas votó que se debía conceder al creacionismo el mismo espacio en las escuelas, el sentir general comenzó a cambiar. La Academia Nacional de Ciencias preparó un dictamen para el Tribunal Supremo en el caso de la "Ley de la Creación" de Louisiana, y le encargó a Ayala que dirigiera su elaboración. Se publicó en 1984 bajo el título de *Science and Creationism: A View from the National Academy of Sciences*.

Para la segunda edición, de 1999, Ayala propuso que se incluyeran las opiniones de algunos teólogos, "pero casi me comen vivo", recuerda. La tercera edición, que vio la luz el pasado año, contiene un capítulo con declaraciones de cuatro confesiones religiosas y tres científicos sobre la compatibilidad de la evolución y las creencias religiosas.

Ayala también suscita dudas entre sus colegas por su pertenencia al comité asesor de la Fundación John Templeton, que sólo el año pasado ha dedicado 70 millones de dólares a financiar la investigación y programas académicos "que contemplen las grandes cuestiones de la vida". Algunos científicos se quejan de que el principal objetivo de la organización es infiltrar la religión en la ciencia. Pero Ayala defiende el interés de la fundación en lo que respecta a relacionar la ciencia con las creencias religiosas. "Ha comenzado a hacer cosas muy buenas en los últimos años", explica.

Pese a todo, algunos filósofos de la ciencia, como por ejemplo Philip Kitcher, de la Universidad de Columbia, han acabado por rechazar que la evolución y la fe en un creador providente puedan ser compatibles. Kitcher admira a Ayala, pero se queja de que "alberga tendencias sobrenaturalistas residuales". Para otros, el enfoque de Ayala de debatir las cuestiones teológicas y explicar la ciencia con claridad no es suficiente. Cuando dos tercios de los profesores de la escuela estatal se declaran comprometidos con el creacionismo, es para echarse a temblar, declara la bióloga evolutiva Joan E. Roughgarden, de la Universidad de Stanford. En 2006 Roughgarden escribió lo que denomina un "libro religioso", donde exponía ideas y ejemplos de la evolución extraídos de la Biblia. Hija de misioneros episcopalianos, dice que va al encuentro de los creyentes en su propio campo, e incluso ha subido al púlpito para pronunciar sermones sobre la evolución. Afirma que donde arrecia el debate no es en los conceptos teológicos, como la explicación del mal, sino en los bancos de los templos.

A veces Ayala parece dispuesto a ir allí, en particular cuando habla de la idea de Dios autor del universo. Pero se niega a afirmar o negar una creencia personal en Dios, para permanecer en el terreno de la filosofía. Hay personas inteligentes que reciben el mensaje de la incompatibilidad entre su fe y la ciencia. El objetivo de Ayala, según afirma él mismo, es contribuir a que los creyentes vean en la evolución una aliada.



EL LINAJE HUMANO

Han transcurrido unos 180 años desde el descubrimiento del primer fósil humano. Desde entonces, los paleontólogos han venido reuniendo una vasta colección de hallazgos sobre nuestros antepasados

• • • **KATE WONG**

• • • **Ilustraciones de Viktor Deak**

En "*El origen de las especies*", Charles Darwin reflexionaba sobre la evolución de los organismos, fuesen orquídeas o ballenas. Pero llama la atención que en esa obra capital no hablase de la aparición de los seres humanos. Se limitó a escribir estas escuetas palabras: "Se arrojará luz sobre el origen del ser humano y su historia". Se cree que el silencio de Darwin sobre la cuestión en aquel momento se debió a que era reacio a enfrentarse a los victorianos —y a su pía esposa—, para quienes todas las criaturas vivas, especialmente los seres humanos, eran obra directa de Dios.

El biólogo Thomas Henry Huxley, el "bulldog de Darwin", no tenía ese tipo de reparos. En 1863 escribió *Pruebas de la posición del hombre en la naturaleza*, donde aplicaba la teoría de Darwin a la evolución de los humanos, para llegar a la conclusión de que descendíamos de los simios. Doce años más tarde, el propio Darwin, posiblemente alentado por los trabajos de Huxley, escribió *La ascendencia del hombre*. En esta obra afirmaba que chimpancés y gorilas eran nuestros parientes vivos más próximos, como se seguía de las semejanzas anatómicas que guardamos con ellos, y predijo que encontraríamos los fósiles de nuestros primeros antepasados en Africa, donde todavía moran esos simios. En aquella época sólo se conocía un puñado de fósiles humanos, todos de neandertales desenterrados en yacimientos de Europa occidental.

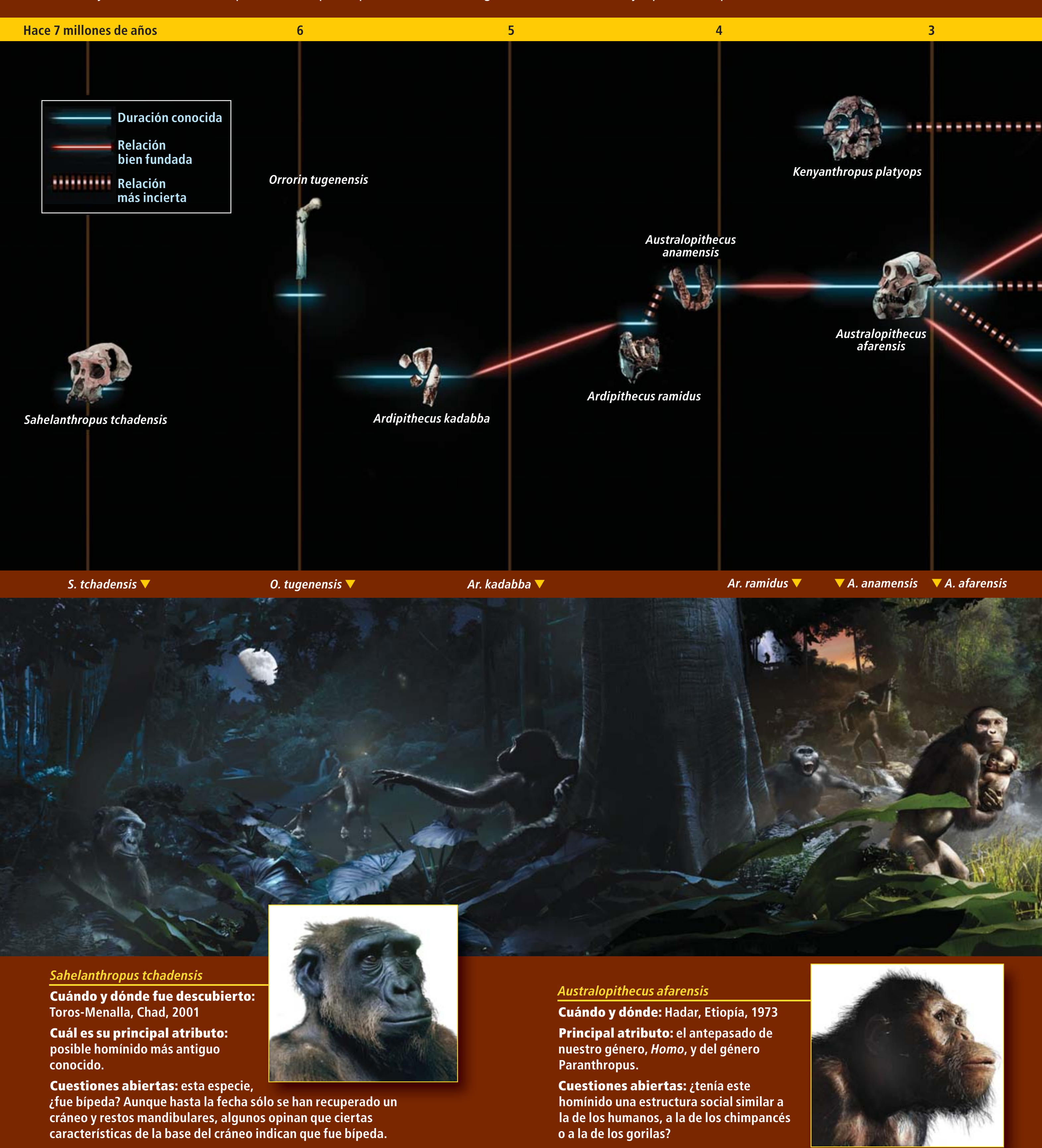
Desde entonces, numerosos fósiles y análisis genéticos han proporcionado datos que demuestran las conclusiones de Darwin. Ahora sabemos que nuestro pariente vivo más próximo es el chimpancé y que los humanos se originaron en Africa, hace entre siete y cinco millones de años, época en que nuestro linaje se separó del linaje de los chimpancés. También hemos descubierto que durante la mayor parte de la prehistoria nuestros antepasados compartieron el planeta con otras especies de homínidos. Además, no somos el final de una sucesión de especies, cada una más erguida que la precedente; nuestro árbol de familia contiene muchas ramas extintas.

La historia de nuestros orígenes todavía no está completa. Los paleontólogos buscan con tenacidad fósiles del último antepasado común de los humanos y los chimpancés. E ignoramos por qué los *Homo sapiens* superaron a los neandertales y a otros humanos arcaicos. Quedan muchos misterios por descifrar en nuestro pasado colectivo. Sin duda, la perspicacia de Darwin seguirá guiándonos hacia su esclarecimiento.

La combinación de pintura, dibujo y escultura en las ilustraciones de Viktor Deak, con la ayuda de las técnicas de ordenador más recientes, crea imágenes del pasado prehistórico de un realismo fotográfico muy notable. Deak nació en Budapest en 1977, pero se crió en Estados Unidos. Ha ilustrado, para el Museo Americano de Historia Natural, una guía de campo de 23 especies humanas extintas.

○○○ Fósiles

El árbol que aparece aquí es sólo una entre varias interpretaciones del registro fósil de los homínidos. Hay quienes distinguen en los fósiles muchas especies; otros, menos. Algunas de las relaciones entre especies están bien fundadas (*líneas continuas rojas*); otras, sólo son provisionales (*líneas de trazos rojas*). Las ilustraciones reproducen el aspecto que se cree tuvieron algunos de esos homínidos y representan episodios decisivos de la odisea humana.



Sahelanthropus tchadensis

Cuándo y dónde fue descubierto: Toros-Menalla, Chad, 2001

Cuál es su principal atributo: posible homínido más antiguo conocido.

Cuestiones abiertas: esta especie, ¿fue bípeda? Aunque hasta la fecha sólo se han recuperado un cráneo y restos mandibulares, algunos opinan que ciertas características de la base del cráneo indican que fue bípeda.

Australopithecus afarensis

Cuándo y dónde: Hadar, Etiopía, 1973

Principal atributo: el antepasado de nuestro género, *Homo*, y del género Paranthropus.

Cuestiones abiertas: ¿tenía este homínido una estructura social similar a la de los humanos, a la de los chimpancés o a la de los gorilas?

Hace 2 millones de años | 1

Homo/Kenyanthropus rudolfensis

Australopithecus garhi

Homo habilis

H. ergaster

H. antecessor

Australopithecus africanus

P. robustus

P. boisei

Paranthropus aethiopicus

▼ A. garhi | A. africanus ▼ | K. rudolfensis ▼ | ▼ H. habilis | ▼ P. boisei | ▼ H. ergaster | ▼ H. erectus





Homo habilis

Cuándo y dónde: Garganta de Olduvai, Tanzania, 1962

Principal atributo: el primer homínido del que conste que tallaba instrumentos líticos.

Cuestiones abiertas: esta especie, de la que se sabe poco, fue muy similar a los *Australopithecus*, incluso pudo haber pertenecido a este género, en vez de al *Homo*.

H. ergaster

Cuándo y dónde: lago Turkana, Kenia, 1971

Principal atributo: el primer homínido que salió de Africa.

Cuestiones abiertas: se desconoce el motivo por el que nuestros antepasados salieron de su continente natal unos cinco millones de años después de la aparición de los homínidos.



Hace 500.000 años | 250.000 | 100.000 | 50.000 | 20.000 | Hoy

H. neanderthalensis

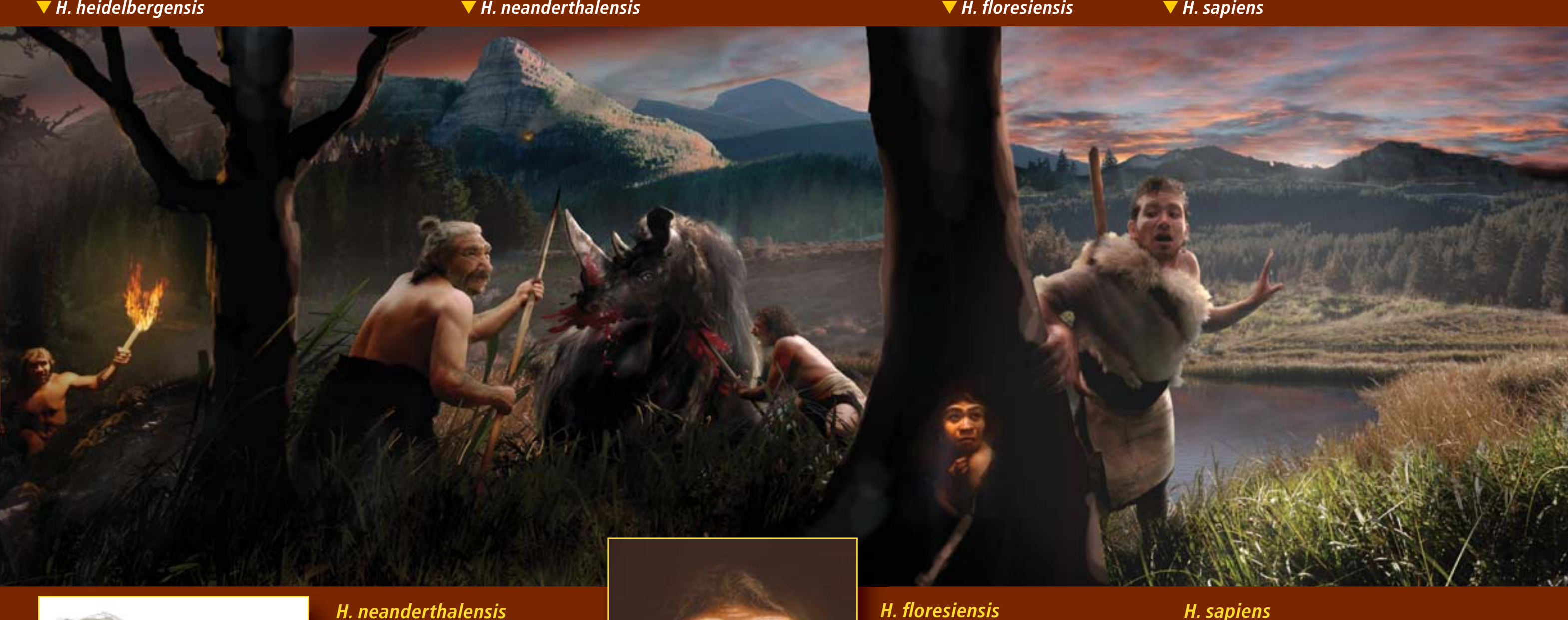
H. heidelbergensis

H. sapiens

H. erectus

H. floresiensis

▼ *H. heidelbergensis* ▼ *H. neanderthalensis* ▼ *H. floresiensis* ▼ *H. sapiens*





H. neanderthalensis

Cuándo y dónde: Engis, Bélgica, 1829

Principal atributo: cazador de caza mayor que dominó la Europa glacial y Asia occidental durante cerca de 200.000 años.

Cuestiones abiertas: si se hibridaron con los *H. sapiens* o no.



H. floresiensis

Cuándo y dónde: Flores, Indonesia, 2004

Principal atributo: el último de los homínidos extintos, con unas dimensiones y un cerebro excepcionalmente pequeños.

Cuestiones abiertas: ¿quién fue el antepasado de este homínido? ¿Una especie de tamaño grande del género *Homo* o alguna especie más parecida a los australopitecos?

H. sapiens

Cuándo y dónde: los fósiles más antiguos se descubrieron en Omo, Etiopía, en 1967

Principal atributo: el único homínido que colonizó todos los continentes y el primero que utilizó sistemáticamente los símbolos y creó manifestaciones artísticas.

Cuestiones abiertas: ¿fueron los *H. sapiens* capaces desde un principio del pensamiento simbólico o se desarrolló éste tras posteriores mutaciones genéticas?



Rasgos anatómicos del pasado

Hemos heredado estructuras anatómicas de peces y renacuajos. Estos remanentes evolutivos son los culpables de las hernias, el hipo y otras deficiencias

• • • NEIL H. SHUBIN

Empecé a enseñar anatomía humana por las mismas fechas en que la universidad remodelaba mi laboratorio. La coincidencia no pudo haber sido más propicia. Enseñar anatomía por primera vez supone un reto y no sólo por la copiosa terminología que hay que aprender. Si echamos una ojeada al interior del cuerpo humano, se nos revelan estructuras que han persistido durante el curso de la evolución, una suerte de maraña confusa, donde arterias, nervios y otras estructuras realizan recorridos extraños para ir de una parte a otra del cuerpo.

Mientras me esforzaba por entender las estructuras internas del cuerpo humano, la universidad me dio espacio en un edificio centenario que iban a reconvertir en un laboratorio moderno. Cuando picamos las paredes para arreglar la fontanería y la electricidad, nos encontramos una madeja de cables, alambres y cañerías, carentes de función aparente, que se enroscaban y retorcían extrañamente por todo el edificio. Nadie en su sano juicio habría diseñado un edificio con semejante embrollo. Construido en 1896, mostraba un diseño antiguo, que se había ido arreglando de forma chapucera durante décadas en las sucesivas renovaciones. Si queríamos comprender la enrevesada trayectoria de un cable o una cañería, había que conocer su historia y las modificaciones experimentadas en el transcurso del tiempo. Lo mismo sirve para las estructuras que componen el cuerpo humano.

Tomemos el cordón espermático, el tubo que conecta los testículos, en el escroto, a la uretra, en el pene. El esperma sale del cuerpo siguiendo la trayectoria del tubo. Dado que el escroto se halla al lado del pene, podría pensarse que el mejor diseño correspondería al recorrido más corto: una línea recta entre las dos estructuras. No es así. El cordón espermático asciende desde el escroto, gira en el interior de la pelvis, desciende a través de una abertura debajo de las articulaciones de la cadera y, por fin, viaja hacia la uretra, en el interior del pene. Semejante trayectoria —un legado histórico— resulta desconcertante, por incomprensible, a los estudiantes de medicina y a los varones que sufren ciertos tipos de hernias a causa de ella.

CONCEPTOS BASICOS

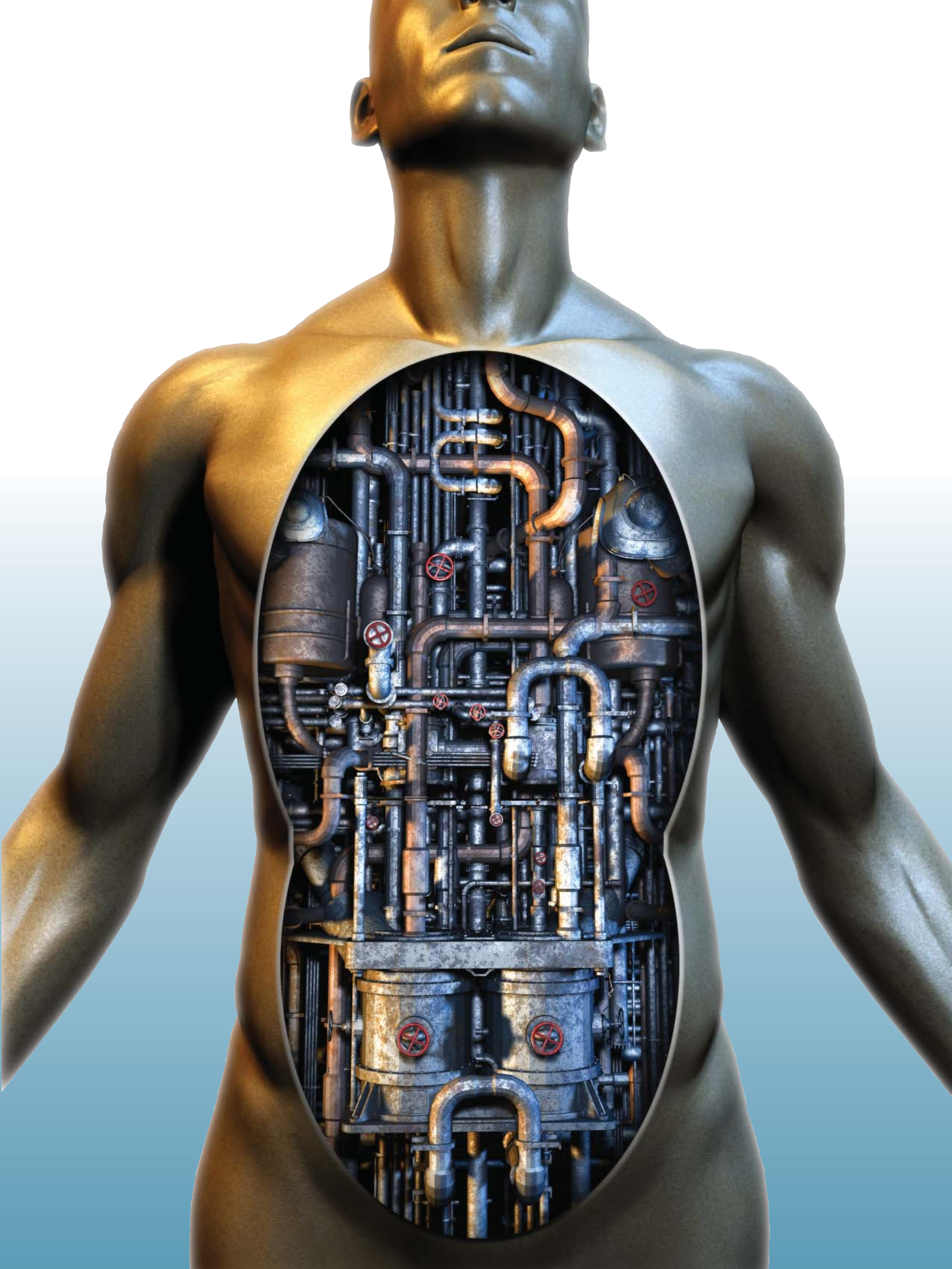
- La trayectoria de los nervios y fluidos del cuerpo humano guarda semejanza con la maraña de cables y cañerías de una casa antigua. Es un legado de nuestros antepasados ictíneos y anfibios.
- El tubo por el que pasa el esperma forma un complicado bucle que provoca hernias. Tal conformación constituye el resultado de cambios anatómicos acaecidos en el curso de nuestra evolución a partir de los peces.
- Los nervios que heredamos de los peces y se extienden del cerebro al diafragma pueden irritarse y desencadenar hipo. Este mecanismo de cierre de la entrada al tubo respiratorio constituye un residuo de los anfibios que nos precedieron y que respiraban mediante pulmones y branquias.

La herencia de los peces

Para interpretar nuestro cuerpo debemos examinar la historia que compartimos con todos los seres vivos: desde microorganismos y vermes hasta peces y primates. En el caso del cordón espermático, las gónadas humanas empiezan a desarrollarse de forma similar a las de los tiburones, peces y otros vertebrados. La formación de las gónadas humanas (ovarios en las mujeres y testículos en los varones) se produce más arriba, cerca del hígado, por la razón presumible de que es allí donde ocurren las interacciones entre los tejidos que se desarrollan en las gónadas. En los tiburones y peces adultos, las gónadas suelen permanecer cerca del hígado. Mantienen esa configuración ancestral probablemente porque su esperma se desarrolla dentro de la cavidad corporal.

El funcionamiento de los mamíferos difiere del comportamiento de los peces que nos precedieron. Al desarrollarse el feto masculino, las gónadas descienden. En las mujeres, los ovarios bajan desde la zona media del cuerpo para colocarse cerca del útero y de las trompas de Falopio. Semejante desplazamiento asegura

KENN BROWN *Mondolithic Studios*



El autor

Neil H. Shubin es responsable de asuntos académicos del museo Field. También es paleontólogo y decano adjunto de biología evolutiva y de los organismos; ocupa la cátedra Robert R. Bensley de la Universidad de Chicago. Sus trabajos han arrojado luz sobre trasformaciones clave en la evolución: de los reptiles a los mamíferos, del océano a tierra firme.

que el óvulo no tenga que viajar muy lejos para ser fecundado. En los varones, las gónadas recorren un camino más largo: deben llegar a la bolsa escrotal, extendida desde el cuerpo.

Tal conformación resulta determinante para la producción de un esperma sano. Los mamíferos somos de sangre caliente; se supone que la cantidad y calidad del esperma dependen de que éste se desarrolle a una temperatura inferior a la del cuerpo. De hecho, un estudio sugiere que la calidad del esperma mejora si, en lugar de utilizar calzoncillos ajustados, que presionan el escroto contra el cuerpo, se usan de tipo *boxer*, que permiten que cuelgue. El escroto de los mamíferos corresponde a un saco separado el cuerpo, más caliente, que se eleva y desciende para controlar la temperatura a la que se desarrolla el esperma.

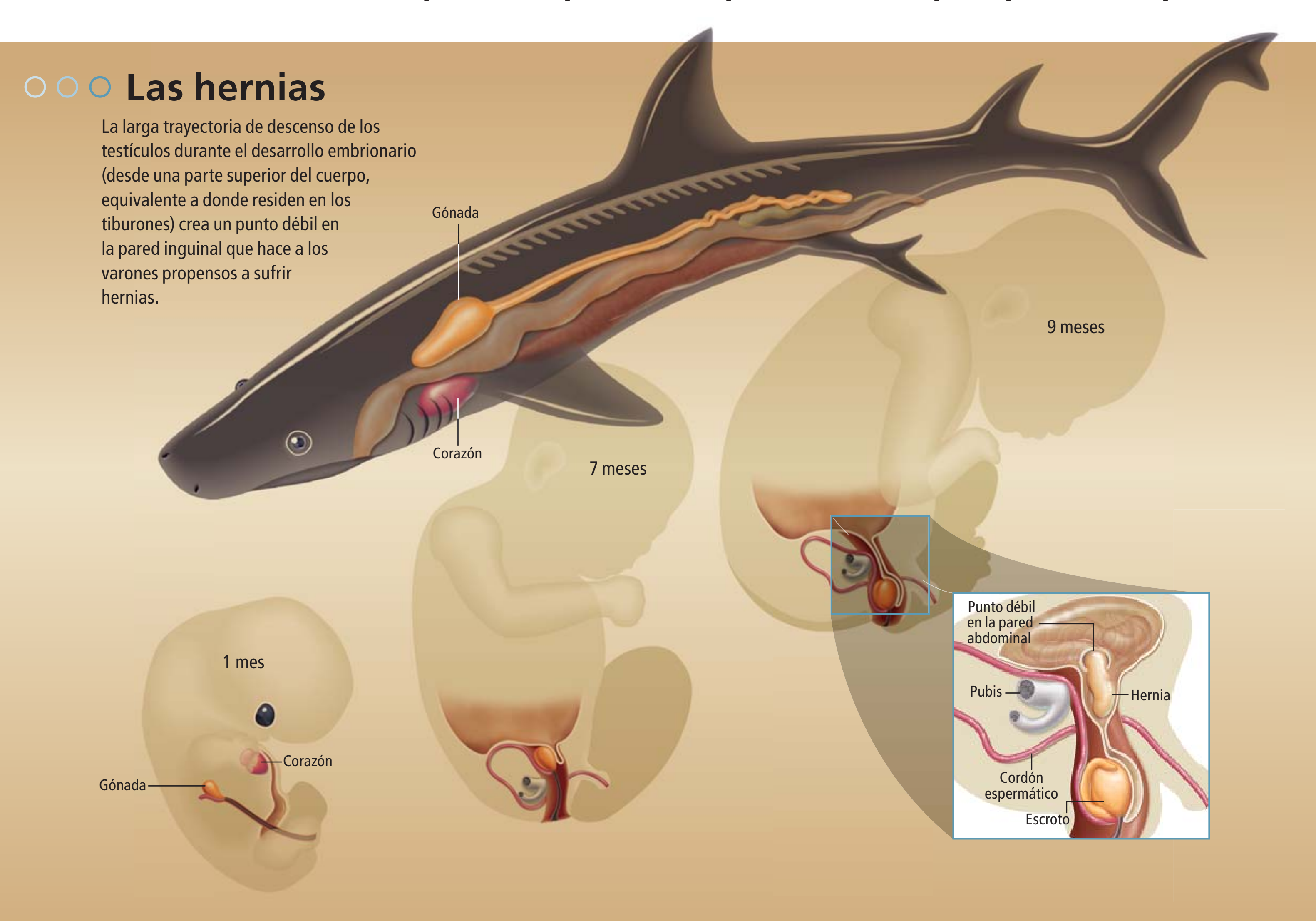
Y ahí llega el problema. Para que los testículos se posen en la bolsa escrotal tienen que descender un trecho largo, obligando al cordón espermático a seguir un bucle enrevesado. Desgraciadamente, el bucle provoca en los machos una debilidad en la pared abdominal cerca de su terminación. Cuando un fragmento de víscera se insinúa a través de este punto débil, se producen varios tipos de hernias, unas congénitas y otras adquiridas. Las primeras ocurren cuando algunas piezas del intestino viajan con las gónadas y descienden a través de la pared abdominal; las segundas se desarrollan más tarde. La propensión a adquirir ciertos tipos de hernias refleja, pues, capas de historia humana: nuestro pasado pez y nuestro presente mamífero.

Por qué tenemos hipo

El mismo tipo de análisis evolutivo puede aplicarse a otros desarreglos. Pensemos en el hipo, que puede limitarse a una simple molestia de unos minutos o convertirse en un trastorno que altera la vida durante meses o, en raras ocasiones, años. El hipo lo provoca una contracción del diafragma. El sonido característico "hip" se produce cuando inspiramos aire de forma repentina mientras se cierra la glotis, la hendidura anterior de la laringe. Todos esos movimientos son involuntarios. Hacemos "hip" sin ninguna intención buscada. El hipo aparece por distintas razones: por comer en exceso o demasiado deprisa y por motivos más graves, como tumores en el área torácica.

El hipo refleja al menos dos fases de nuestra historia: una que compartimos con los peces

ALICE Y. CHEN

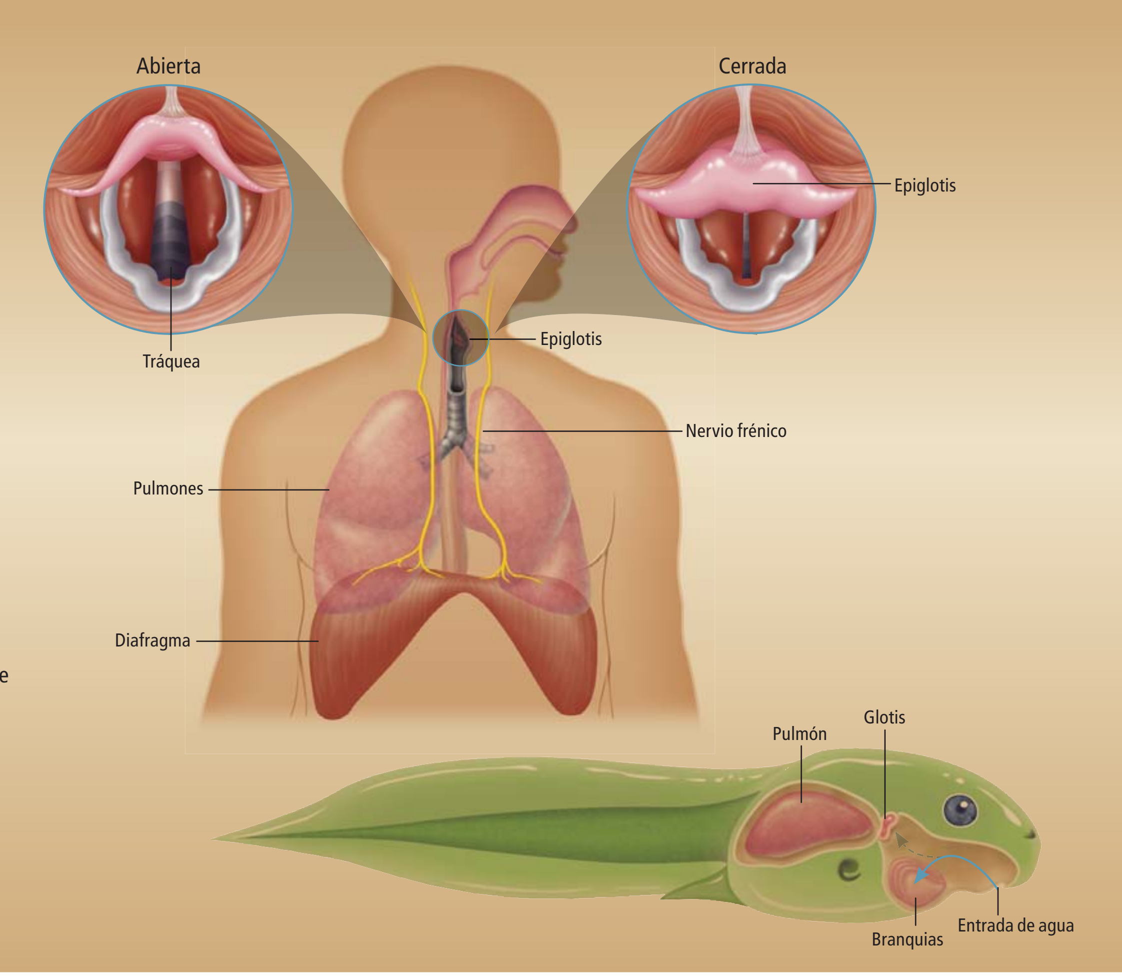


Las hernias

La larga trayectoria de descenso de los testículos durante el desarrollo embrionario (desde una parte superior del cuerpo, equivalente a donde residen en los tiburones) crea un punto débil en la pared inguinal que hace a los varones propensos a sufrir hernias.

El hipo

El hipo puede causarlo, entre otros, el bloqueo o las lesiones que provocan la retorsión de los nervios frénicos responsables de la respiración, un remanente evolutivo de los peces. Estos nervios transmiten señales desde el cerebro y producen un espasmo del diafragma, haciendo que la glotis se cierre de golpe. La inspiración repentina de aire y el bloqueo de la laringe, el hipo, constituye un legado de los renacuajos, que bombean agua a la boca cuando respiran a través de las branquias. Al propio tiempo, se les cierra la glotis para evitar que el agua entre en los pulmones, que utilizan para la respiración en tierra.



ALICE Y. CHEN

y otra con los anfibios. De los peces heredamos los nervios principales que controlan la respiración. Dos de ellos, el vago y el frénico, se extienden desde la base del cráneo y cursan a través de la cavidad torácica y el diafragma. Ese recorrido tortuoso origina problemas: cualquier cosa que interrumpa el camino de los nervios a lo largo de su recorrido afecta a nuestra capacidad para respirar. La irritación de esos nervios puede provocar hipo. Si el cuerpo humano tuviera un diseño más racional, los nervios no viajarían desde el cuello, sino desde un punto cercano al diafragma. Sin embargo, hemos heredado ese diseño de nuestros antepasados los peces, que cuentan con branquias situadas cerca de la cabeza, no un diafragma más abajo.

Si la extraña trayectoria de los nervios se la debemos a nuestra historia ictínea, el hipo puede haber surgido del pasado que compartimos con los anfibios. Resulta que el patrón de la actividad muscular y nerviosa del hipo se da de forma natural en otros organismos. No en cualesquiera. En concreto, se observa en los renacuajos, que respiran mediante los pulmones y las branquias. Cuando usan las branquias se encuentran con un problema: tienen que bombear agua a la boca para después conducirla a través de las branquias, evitando que entre en los pulmones. Inspiran de forma súbita, mientras cierran la glotis para clausurar el tubo respiratorio. En esencia, respiran mediante las branquias usando una forma de hipo.

Hemos pasado varias etapas de nuestro pasado remoto en antiguos océanos, riachuelos y sabanas; no en edificios de oficinas, pistas de esquí o campos de fútbol. Tamaña desconexión entre pasado y presente explica algunos de los desmoronamientos que sufre nuestro cuerpo. Los huesos más importantes de la rodilla, la espalda y la muñeca humana surgieron en criaturas acuáticas hace cientos de millones de años. No sorprende, por tanto, que nos desgarremos los cartílagos de las rodillas y padezcamos dolor de espalda por caminar sobre dos piernas, o desarrollemos el síndrome del túnel carpiano por escribir a mano o en un teclado. Ni los peces ni los anfibios que nos precedieron realizaban semejantes tareas.

Tomemos el plano corporal de un pez, modifiquémoslo con genes alterados de un verme y disfracémoslo para que parezca un mamífero; estiremos y retorzamos luego el cuerpo de marras para conseguir un organismo que camine erguido, hable, piense y controle los dedos. El resultado: una receta desastrosa. Podemos "disfrazar" al pez sólo hasta cierto punto, si no queremos sufrir las consecuencias de semejante chapucería. En un mundo perfectamente diseñado, sin un legado histórico tan extenso, no padeceríamos hemorroides ni hernias. Ni sería tan cara la remodelación de un edificio.

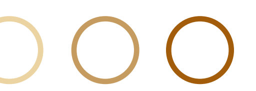
Bibliografía complementaria

WHY WE GET SICK: THE NEW SCIENCE OF DARWINIAN MEDICINE. Randolph M. Nesse y George C. Williams. Vintage; 1996.

EVOLVING HEALTH: THE ORIGINS OF ILLNESS AND WHY THE MODERN WORLD IS MAKING US SICK. Noel T. Boaz. Wiley; 2002.

EVOLUTIONARY MEDICINE AND HEALTH: NEW PERSPECTIVES. Wenda R. Trevathan, E. O. Smith y James J. McKenna. Oxford University Press; 2007.

YOUR INNER FISH: A JOURNEY INTO THE 3.5-BILLION-YEAR HISTORY OF THE HUMAN BODY. Neil Shubin. Panthon; 2008.



Evolución "por el bien del grupo"

La selección de grupo, aceptada en un comienzo de forma acrítica, cayó en el descrédito. Ha llegado el momento de acometer una valoración más precisa del proceso

DAVID SLOAN WILSON Y EDWARD O. WILSON

¿Es la evolución un deporte de equipo o una competición por la supervivencia que se disputa entre individuos? No hay duda de que la selección natural actúa sobre los organismos individuales. Aquellos que poseen rasgos favorables tienen mayor probabilidad de transmitir sus genes a la generación siguiente. Pero es posible que se den otros procesos similares en los distintos niveles de la jerarquía biológica, de modo que la selección natural perpetúe rasgos que no favorecen a un individuo, sino a una unidad social, se trate de una bandada o colonia, una especie entera o incluso de un ecosistema compuesto por muchas especies. La pregunta de fondo es: ¿puede un rasgo biológico evolucionar por "el bien del grupo"?

Muchos de los primeros evolucionistas aceptaron la idea de la selección de grupo sin pensárselo mucho. Les parecía, por ejemplo, que cabía decir que las manadas de animales rumiantes habían evolucionado en el sentido de poder mantener a largo plazo su suministro de alimento. Las manadas que restringiesen su alimentación tendrían una mayor probabilidad de sobrevivir que las que agotaran rápidamente un recurso esencial. Pero al analizar la cuestión con más detalle, otros biólogos descubrieron un error en el razonamiento. El uso prudente de los recursos beneficia a todos los miembros del grupo, incluso al "tramposo" que consume más que el resto. Los genes asociados a ser tramposo se esparcirán por el grupo y la tendencia al uso cooperativo de los recursos quedará socavada. La situación es muy familiar en la experiencia humana; es el fenómeno que Garrett Hardin denominó "la tragedia de los bienes comunales".

A mediados de los años sesenta, las ideas relativas a la selección de grupo estaban muy mal vistas; se evitaba la expresión en manuales y bibliografía científica. Cuando los biólogos observaban conductas que parecían beneficiosas para el grupo o la especie, se esforzaban por explicarlas únicamente por medio de la selección individual. Así, los animales cooperarían porque comparten genes ("selección por parentesco") o por una probable ayuda recíproca en el futuro. El altruismo aparente se interpretaba como un egoísmo inteligente. Llegó a ser casi de rigor orillar las menciones a la selección de grupo.

Ha llegado el momento de hacer una valoración más cuidadosa y sin prejuicios de la selección de grupo en el pensamiento evolutivo. La forma más ingenua de selección de grupo —la que axiomáticamente supone que la conducta evoluciona por el bien del grupo— es insostenible. Sin embargo, hay rasgos beneficiosos para el grupo que, a pesar de tener un coste privado, surgen en la evolución por selección natural. El hecho de que los tramposos tengan una ventaja en el seno de un grupo no implica que prevalezcan en la población en su conjunto. La selección dentro de grupos se opone a la selección entre grupos; el resultado final depende de la fuerza relativa de esos efectos. Antes de rechazar

CONCEPTOS BASICOS

- La selección natural actúa en los distintos niveles de la jerarquía de los sistemas biológicos: entre los genes dentro de los individuos, entre los individuos dentro de los grupos de individuos, entre los grupos dentro de las poblaciones e incluso en niveles más altos.
- La selección en un nivel inferior puede socavar la operada en un nivel más alto. Para determinar cuál se impondrá hay que tomar caso por caso.



categóricamente la selección de grupo y los razonamientos basados en "el bien del grupo", debemos evaluar el equilibrio entre los niveles de selección caso por caso.

Muñecas rusas

Para tener una idea clara de la selección de grupo hay que comparar la supervivencia y reproducción de los individuos de manera adecuada. El problema con las conductas "por el bien del grupo" estriba en que resultan *localmente* desventajosas. Puede ser ventajoso para un miembro prudente de una manada la conservación de recursos, pero lo será aún más para un tramposo. La selección natural se basa en la eficacia o adecuación biológica relativa. Si los ciudadanos responsables tienen menos eficacia biológica que los tramposos de su mismo grupo, tendremos que añadir algo para explicar que la evolución conduzca a la existencia de aquellos en la población. Ese algo es una diferencia positiva en la eficacia biológica a una escala mayor. Los grupos de ciudadanos responsables tienen una eficacia mayor que los grupos de tramposos.

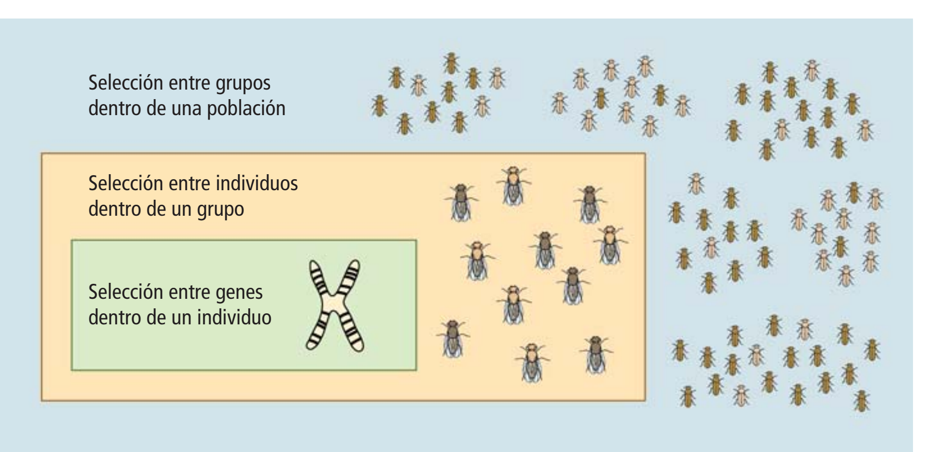
Estas capas de interacción que compiten y evolucionan son como las muñecas rusas, las *matrioskas*, encajadas unas dentro de otras. En cada nivel de la jerarquía, la selección natural favorece un conjunto distinto de adaptaciones. La selección de individuos dentro de grupos favorece la conducta tramposa a expensas del grupo. La selección entre grupos dentro de la población total favorece las conductas que aumentan la eficacia biológica relativa del grupo, aunque estas conductas también puedan tener un efecto negativo a una escala todavía mayor. Se puede extender la jerarquía hacia abajo, al estudio de la selección entre genes dentro un organismo, o hacia arriba, al estudio de la selección de entidades de un nivel más alto. La regla general puede enunciarse así: la adaptación en el nivel X requiere un proceso correspondiente de selección en el nivel X y tiende a ser socavada por la selección en niveles inferiores.

A esta visión de la evolución se la denomina "teoría de la selección multinivel (SMN)". Aunque el término "selección multinivel" es más reciente que el de "selección de grupo", la lógica de las muñecas rusas estaba ya presente en la obra de Darwin.

Darwin no habría pensado en la selección de grupo si no hubieran existido rasgos que son selectivamente desventajosos dentro de los grupos. En un famoso pasaje de *La ascendencia del hombre*, señala que quienes son rectos tienen dentro de su propia "tribu" una desventaja obvia respecto a los que no lo son, pero las tribus de gentes moralmente rectas terminarán

1. LAS CARRERAS CICLISTAS ilustran algunos de los conflictos entre los intereses de los grupos y los intereses de los individuos que se observan en la evolución biológica. Un pequeño grupo de ciclistas irá más deprisa si coordinan sus esfuerzos. Cada ciclista se coloca por turno en la cabeza del grupo, donde la resistencia al viento es mayor, para luego descansar en la estela de los otros. Cada ciclista compite como un individuo y, por tanto, tiene el incentivo de conservar energías hasta el último momento de la carrera. Por otra parte, si hay demasiados rodadores que eluden su obligación en la cabeza, el pelotón acabará por alcanzar al grupo escapado. Una situación análoga se da en la biología evolutiva, cuando los individuos compiten entre sí. La fotografía se tomó de la quinta etapa del Tour de Francia de 2006. Un grupo de ocho ciclistas se escapó del pelotón, que los alcanzó antes de que la etapa acabase.

FRANCK FIFE/AFP/*Getty Images/American Scientist*



2. LA TEORIA DE LA SELECCION MULTINIVEL describe una jerarquía de procesos evolutivos organizados como las muñecas rusas encajadas.

por superar a las demás. Concluye diciendo: "... y eso sería selección natural". Está claro que en este pasaje Darwin razona según la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN. Aunque no dice nada sobre la paradoja de que la moralidad expresada dentro de los grupos pueda resultar moralmente problemática en las interacciones entre grupos, su ejemplo hipotético ilustra perfectamente la regla general enunciada arriba: la selección que produce adaptación a un nivel causa problemas en los niveles superiores.

Otros evolucionistas elaboraron la idea de Darwin durante la primera mitad del siglo xx, especialmente los fundadores de la genética de poblaciones, Ronald Fisher, J. B. S. Haldane y Sewall Wright, quienes fundamentaron la idea matemáticamente. Sus modelos diferían en los detalles, pero todos plasmaban la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN. Por desgracia, muchos biólogos ignoraron estos modelos y siguieron pensando ingenuamente sobre la selección de grupo, como ya se ha mencionado.

Es interesante la historia de cómo se llegó al rechazo generalizado de la selección de grupo. A finales de los años cincuenta, la Universidad de Chicago era un semillero de seleccionistas de grupo ingenuos. George G. Williams, un recién llegado, con plaza posdoctoral, asistió a un seminario de Alfred E. Emerson, especialista en termes que comparaba la naturaleza con una colonia de termes. A Williams no le satisfizo la ingenuidad de las afirmaciones de Emerson y decidió escribir un libro que aclarase los razonamientos correctos e incorrectos sobre la adaptación y la selección natural. Mientras Williams escribía su libro, Vero C. Wynne-Edwards publicaba otro, titulado *Animal Dispersion in Relation to Social Behavior* ("La dispersión animal en relación con la conducta social"). Wynne-Edwards interpretaba una vasta colección de conductas sociales de animales en términos de adaptaciones que permitían evitar la sobreexplotación de los recursos. Era consciente de que tal prudencia podía ser selectivamente desventajosa dentro de los grupos, pero supuso que dimanaba de la evolución a través de la selección de grupo. Esta idea demasiado general de Wynne-Edwards fue ampliamente discutida y criticada. Cuando Williams publicó su *Adaptation and Natural Selection* ("Adaptación y selección natural") en 1966, los biólogos evolucionistas se mostraban ya propensos a adoptar un consenso.

Williams defendió enérgicamente para un público más amplio lo que un pequeño grupo de expertos sabía: la evolución podía engendrar rasgos que son "por el bien del grupo", pero sólo gracias a un proceso de selección de grupo tan fuerte, que supere la selección dentro de los grupos. Un pasaje clave incide en este punto:

> *Es aceptado universalmente, por quienes se ocupan con seriedad de este problema... que tales adaptaciones vinculadas al grupo deben atribuirse a la selección natural de grupos alternativos de individuos y que la selección natural de alelos alternativos dentro de poblaciones se opondrá a ese desarrollo. Coincido por completo con el razonamiento en que se fundamenta esa conclusión. Sólo mediante una teoría de selección entre grupos puede lograrse una explicación científica de las adaptaciones asociadas al grupo.*

Pero Williams no se detenía ahí. Tras insistir en que la selección de grupo era necesaria para explicar las adaptaciones del nivel de grupo, argumentaba que la selección de grupo era invariablemente débil comparada con la selección dentro de grupos. En sus propias palabras: "no existen adaptaciones vinculadas al grupo".

Resumiendo: Wynne-Edwards y Williams aceptaban la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN y ambos sostenían categóricamente que uno de los dos niveles dominaba sobre el otro. Williams fue más persuasivo entre los evolucionistas, lo que condujo al rechazo generalizado de la selección de grupo. A varias generaciones de estudiantes se les ha enseñado que la evolución puede llevar en principio a adaptaciones en el nivel de grupo, pero que en la práctica no lo hace nunca, por lo que los razonamientos basados en el bien del grupo son, sin más, erróneos. Las conductas que parecen ser para el bien del grupo deben explicarse de modos compatibles con el interés individual, como en la selección por parentesco o la reciprocidad.

Mirando hacia atrás, parece claro que ambas posturas eran extremas. El equilibrio entre

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

los niveles de selección puede inclinarse en cualquier dirección. La selección entre grupos suele ser una fuerza débil, como Williams supuso, pero también puede llegar a ser muy fuerte, hasta propiciar que los grupos evolucionen hacia superorganismos. No existe una fórmula sencilla; las respuestas deben buscarse caso por caso. Algunos ejemplos de adaptación en el nivel de grupo reforzarán esa postura.

Colonias de invertebrados marinos

Podemos empezar con los organismos que presentan límites difusos entre el individuo y el grupo. Un ejemplo espectacular nos lo dan unas elegantes formas de vida marina, los sifonóforos, que incluyen a la carabela portuguesa. Muchos invertebrados marinos viven formando colonias de organismos que se unen físicamente entre sí. En algunos casos, pensemos en los corales, los miembros de las colonias están indiferenciados y funcionan como unidades autónomas. Un sifonóforo, por el contrario, es una colonia de individuos con formas y funciones especializadas. Algunos miembros de la colonia se encargan de la locomoción, otros de capturar la presa y otros trabajan en la digestión y asimilación. Existe incluso un sistema nervioso rudimentario. Los sifonóforos han creado, pues, un nuevo tipo de organismo mediante la transformación de organismos más simples en órganos. ¿Puede interpretarse que dichas especializaciones son "por el bien de la colonia", a la manera en que se entiende que los órganos operan "por el bien del individuo"?

Muchos evolucionistas dirían que sí, pero conviene analizar el razonamiento que permite que un ejemplo de ese tenor se tenga por compatible con el rechazo de la selección de



CORTESIA DE CASEY DUNN, UNIVERSIDAD BROWN/*American Scientist*

3. UN SIFONOFORO ES UNA ASOCIACION COLONIAL de organismos más simples que se han diferenciado para realizar funciones que benefician a la colonia. En este espécimen de *Marrus orthocanna*, la estructura superior es un flotador o pneumatóforo. Los apéndices semitransparentes en forma de jarro situados bajo el flotador son los nectóforos, encargados de la locomoción. Los tentáculos rizados de la parte inferior derecha están unidos a los pólipos que capturan el alimento. Las rayas naranjas y brillantes de la parte superior derecha son células urticantes. Muchas de las estructuras son transparentes; el color procede del alimento ingerido. En los sifonóforos, la selección natural actúa dentro de la colonia y entre colonias.

grupo. Puesto que las colonias de sifonóforos crecen por reproducción asexual, sus miembros son genéticamente idénticos. ¡*Por supuesto* que se puede considerar que la colonia es una unidad adaptativa, similar a un organismo multicelular! ¿Qué tiene que ver esto con la selección de grupo?

Para responder a la cuestión sólo necesitamos la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN. Si todos los miembros de una colonia son genéticamente idénticos, entonces no se puede hablar de selección dentro de las colonias. Las adaptaciones serán el resultado de la evolución sólo si gracias a ellas unas colonias sobreviven y se reproducen mejor que otras. El ejemplo representa un caso puro de selección entre grupos, no una negación de la selección entre colonias. Además, no tenemos por qué suponer que los miembros de una colonia —o las células de un organismo multicelular— son genéticamente idénticos. Las mutaciones que pueden producirse en cada división celular crean una posibilidad de selección dentro de las colonias. La evolución ha producido adaptaciones muy refinadas para suprimir la selección entre genes y entre linajes celulares dentro de los organismos multicelulares; presumiblemente, también en las colonias de sifonóforos. El resultado neto es que la división del trabajo y otras características del diseño de las colonias de sifonóforos aparecieron evolutivamente gracias a la selección entre colonias. Si este ejemplo no llama la atención es porque parece obvio. ¿Por qué entonces los evolucionistas aceptan que se diga categóricamente que la selección en niveles superiores se halla invariablemente condenada por la selección en los niveles inferiores?

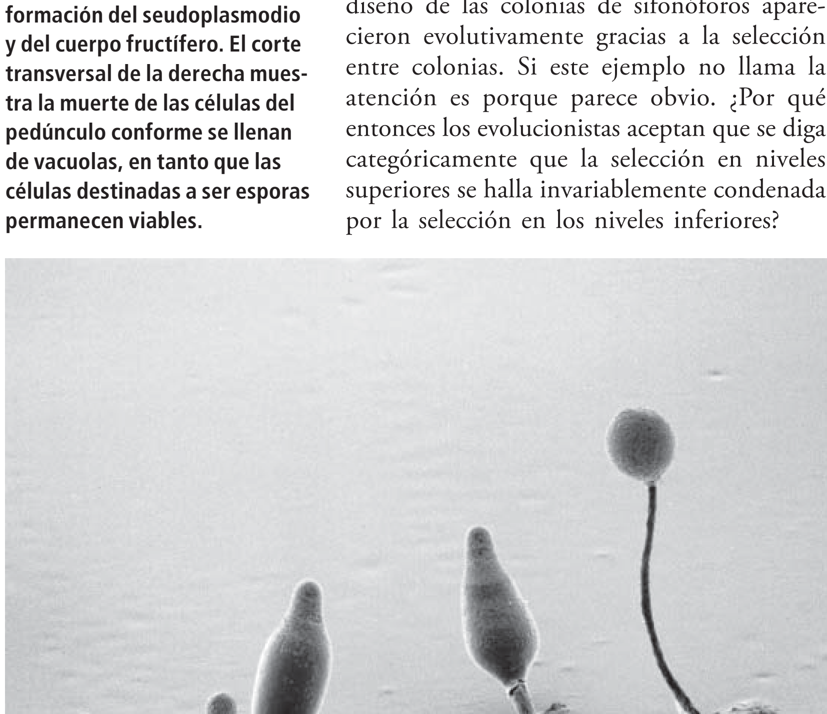
Mohos mucilaginosos celulares

Otra especie que se encuentra en la frontera entre el individuo y el grupo es el moho mucilaginoso celular *Dictyostelium discoideum*. En parte extensa de su ciclo biológico *Dictyostelium* es una ameba unicelular que habita en el suelo y se alimenta de bacterias y otros protistas. Cuando el alimento escasea, millares de amebas se unen para formar un seudoplasmodio, cuerpo que emigra hacia la luz recorriendo distancias de hasta 20 cm, tras lo cual desarrolla una bola de esporas reproductoras que se mantienen en suspensión sobre un pedúnculo no reproductivo. Las células del pedúnculo mueren y las esporas se dispersan (normalmente al pegarse a un invertebrado de paso) para iniciar una nueva generación.

En los años cincuenta, *Dictyostelium* fue un organismo modelo para el estudio del desarrollo, pero el sacrificio de las células pedunculares "por el bien del grupo" no atrajo demasiado la atención. Sólo posteriormente se convertiría *Dictyostelium* en un organismo modelo para el estudio de la selección multinivel.

Antes de abordar el ejemplo espectacular de la formación suicida del pedúnculo, considérense las sutilezas de la constitución del seudoplasmodio, de su movimiento y de su orientación. La formación de un seudoplasmodio precisa que las células segreguen una matriz de polisacárido. El seudoplasmodio avanza por medio de un movimiento en espiral de las células del interior de la matriz. La orientación hacia la luz requiere una comunicación que coordine los movimientos. Se trata de ejemplos de bienes públicos que reportan a todos el mismo beneficio, aunque demandan esfuerzos individuales. Aun cuando

4. EL MOHO MUCILAGINOSO CELULAR *DICTYOSTELIUM DISCOIDEUM* es otro ejemplo de competencia individual dentro del grupo y de cooperación para la perpetuación del grupo. Las amebas unicelulares de *Dictyostelium* se unen para formar un seudoplasmodio, que desarrollará un cuerpo fructífero. La micrografía de barrido electrónico de la izquierda muestra varios estadios de la formación del seudoplasmodio y del cuerpo fructífero. El corte transversal de la derecha muestra la muerte de las células del pedúnculo conforme se llenan de vacuolas, en tanto que las células destinadas a ser esporas permanecen viables.





IMAGENES CORTESIA DE LARRY BLANTON, *Universidad estatal de Carolina del Norte* Y MARK J. GRIMSON, *Universidad Técnica de Texas/American Scientist*

el esfuerzo sea mínimo, como pudiera ser el caso de la orientación, los beneficios siguen compartiéndose: todos los individuos que componen el seudoplasmodio se desplazan al mismo lugar; por ese motivo, las diferencias en eficacia biológica que se requieren para explicar la adaptación residen en el nivel del grupo (algunos seudoplasmodios migran hacia sitios mejores que otros). No hay una explicación plausible de todas estas adaptaciones colectivas apelando a la selección dentro de grupos; son adaptaciones en el nivel de grupo y puede aceptarse que son lo que parecen: adaptaciones por el bien del grupo.

Se diría que la formación del pedúnculo es el paroxismo de la autoinmolación en beneficio de otros. Las células individuales tienen un gran incentivo en llegar a ser esporas reproductoras en vez de componentes inertes del pedúnculo. Sin embargo, si todas las células se convirtieran en esporas, no habría pedúnculo que promoviese la dispersión. Se han observado cepas egoístas en el laboratorio y en la naturaleza. El problema consiste en determinar cómo puede la selección entre grupos tener fuerza suficiente para contrarrestar la ventaja selectiva, que tan poderosa parece, del egoísmo dentro del grupo.

Quizá se deba a que el reconocimiento celular permita que se agreguen sólo las amebas con genes idénticos, de suerte que cada seudoplasmodio sea genéticamente uniforme. En este caso habría selección natural, exceptuando los mutantes, sólo en el nivel del grupo, igual que en el caso de los sifonóforos.

O bien puede suceder que algunos individuos se sacrifiquen convirtiéndose en células del pedúnculo, y constituyan sólo una muestra aleatoria: no habría selección genética dentro del seudoplasmodio.

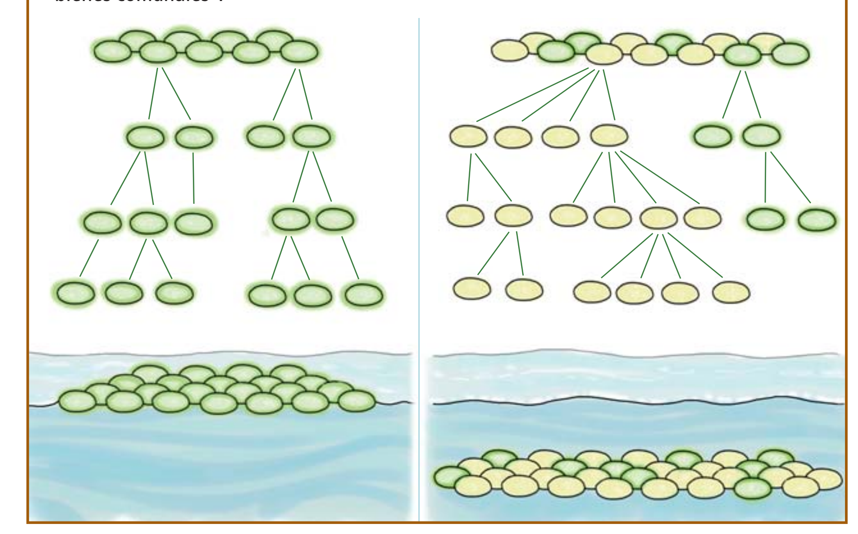
La investigación actual muestra que ninguna de las dos explicaciones es del todo correcta. La selección dentro del grupo opera hasta cierto grado y favorece rasgos que no son adaptativos en el nivel de grupo. Nos engañaríamos si admitiéramos que esos rasgos existen "por el bien del grupo".

Algunas de las cuestiones que suscitan los sifonóforos y *Dictyostelium* se han explorado también en experimentos de laboratorio, con la bacteria *Pseudomonas fluorescens*. Cultivadas en un medio líquido sin agitar, las células consumen enseguida buena parte del oxígeno del medio; sólo queda habitable una fina película cercana de la superficie. A causa de una mutación espontánea denominada *wrinkly spreader*, las células secretan un mucopolisacárido de celulosa que forma un tapete que ayuda a colonizar la superficie acuosa. La producción del polímero resulta cara en términos metabólicos; por tanto, los "tramposos" que no produzcan tendrán una mayor eficacia biológica relativa en el tapete, del que se beneficiarán sin contribuir a su mantenimiento.

Ahora bien, si la proporción de tramposos crece demasiado, el tapete se desintegrará y el grupo entero se hundirá en el medio anóxico. Los experimentos de Paul B. Rainey y Katrina Rainey muestran que el rasgo *wrinkly spreader* se mantiene en la población por selección de grupo, pese a su naturaleza desventajosa en el seno de cualquier grupo.

PSEUDOMONAS FLUORESCENS

La bacteria *Pseudomonas fluorescens* ilustra el equilibrio entre la selección individual y la de grupo en los experimentos de Paul B. Rainey y Katrina Rainey, de la Universidad de Aukland. En un medio sin agitar, las células de *Pseudomonas* pueden sobrevivir sólo en la superficie. Células con el gen *wrinkly spreader* (*verde*) segregan un polímero que forma un tapete flotante (*izquierda*). La producción del polímero tiene un coste metabólico, lo que limita la tasa de crecimiento de las células. Los mutantes que no segregan (*amarillo*) pueden vivir del coste ajeno, beneficiándose del esfuerzo de sus vecinos. Las células "aprovechadas" se reproducen más rápidamente, pero cuando llegan a ser demasiado numerosas el tapete se desintegra y todas se hunden (*derecha*) en una "tragedia de los bienes comunales".



STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

Impulso meiótico

Los tres ejemplos descritos ilustran que la selección entre grupos puede ser una fuerza evolutiva significativa y que puede aceptarse que las adaptaciones en el nivel de grupo hacen honor a su nombre y existen realmente "por el bien del grupo". Ahora vamos a aplicar la teoría SMN a la selección de genes dentro de los individuos.

La meiosis es una división reductora que separa los pares de cromosomas en los gametos. Suele ser equitativa: los dos genes de cada locus de cada cromosoma tienen igual probabilidad de hallarse representados en la siguiente generación. La equidad de la meiosis suprime la selección natural entre genes dentro de un individuo y concentra la selección en el

nivel del individuo, o en otro superior. Esta es la razón de que los individuos estén tan organizados funcionalmente, que merezcan que se les llame "organismo".

Sin embargo, algunos genes encuentran modos de romper las reglas de la meiosis, obteniendo una ventaja dentro del individuo, la así denominada "impulso meiótico". En la mosca de la fruta *Drosophila*, un complejo de genes, el *segregation distorter* (*SD*), se perpetúa a sí mismo a pesar de que es perjudicial para la mosca que lo porta. En los machos heterocigóticos para los genes *SD*, las células espermáticas que portan los genes segregan sustancias tóxicas para el esperma que carece de *SD*. Consecuentemente, casi todo el esperma superviviente es *SD* positivo; este complejo génico estará, pues, sobrerrepresentado en la descendencia de una mosca macho. Resulta ventajoso para los genes, no para la mosca: los machos que reciben los genes *SD* de ambos progenitores son estériles.

El ejemplo muestra que la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN puede aplicarse a todos los niveles de la jerarquía biológica. El impulso meiótico es "por el bien del gen", y sería fútil y erróneo decir que es "por el bien del individuo", pues no lo es. Por otra parte, podemos con seguridad decir que una adaptación del estilo del caparazón de una tortuga es "por el bien del individuo" porque evolucionó en un proceso de selección entre individuos. Los mismos criterios que establecen la legitimidad de los razonamientos basados en el bien del grupo legitiman también los que se basan en el bien del individuo.

¿Selección de grupo o genes egoístas?

Los ejemplos muestran de qué modo la teoría SMN evalúa el equilibrio entre niveles de selección según las circunstancias de cada caso, en vez de afirmar categóricamente que siempre (Wynne-Edwards) o nunca (Williams) prevalece la selección de grupo. ¿Por qué no se ha llegado a este juicioso término medio mucho antes? La respuesta se encuentra, en parte, en un cambio sutil de perspectiva que se desvía de la lógica usual de la teoría SMN.

Pensemos en el caparazón de la tortuga, ejemplo canónico de adaptación en el nivel de individuo. Los genes que contribuyen a esta adaptación no son más eficaces que los genes alternativos, para una tortuga determinada; sí lo son, en cambio, en la población total. Se trata de una manera distinta de declarar que evolucionan. Así, podemos afirmar que el caparazón de la tortuga es el resultado de una evolución por selección en el nivel del gen, definido este tipo de selección por la eficacia de los genes, cuando se considera todo conjuntamente. Importa resaltar que no ha cambiado nada en el ejemplo biológico. La información que permite la comparación de las muñecas rusas sigue disponible, pero optamos por ignorar que los genes logran su éxito por la selección entre individuos, no por la selección dentro del individuo.

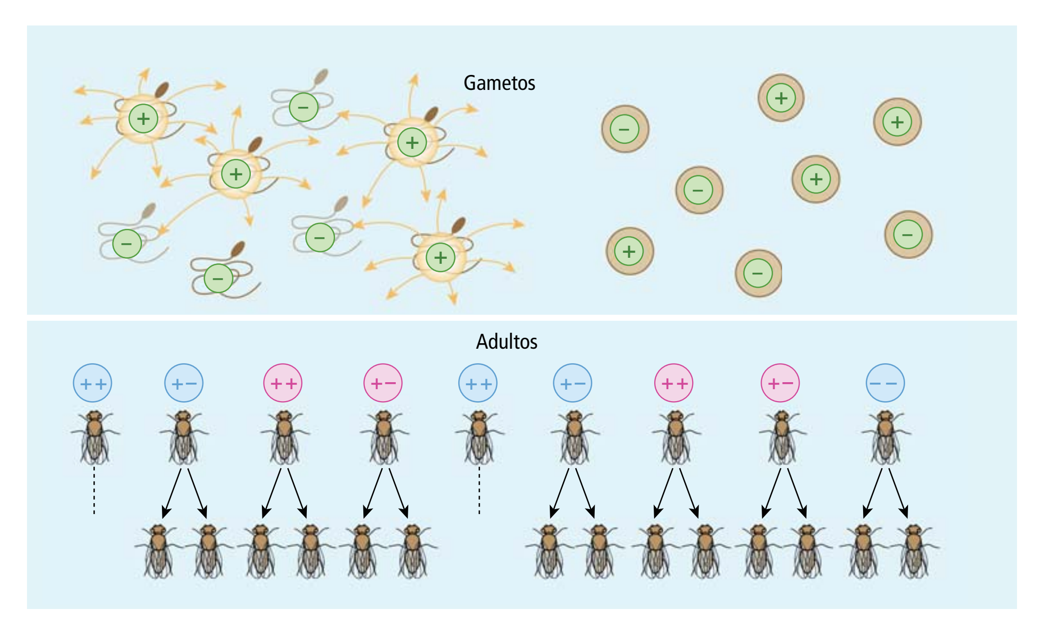
Se puede usar la misma táctica para los individuos dentro de los grupos. Dentro de cada tapete, la cepa *wrinkly spreader* no es más apta que la cepa tramposa, aunque sí más apta en la población total, dondequiera que el tapete evolucione. De ese modo, todas las adaptaciones que evolucionan en el nivel *X*, según las comparaciones de las muñecas rusas, pueden describirse como adaptativas en el nivel génico, independientemente de dónde se ubiquen las diferencias en eficacia biológica dentro de la jerarquía de sistemas.

La visión centrada en el gen ha desempeñado siempre un papel en la genética de poblaciones, bajo el nombre de "efectos medios". Esa denominación se refiere a que haya que promediar los efectos ejercidos por genes alternativos a través de todos los contextos para determinar el resultado de la evolución en la población en su conjunto. Williams expuso esta manera de proceder en *Adaptation and Natural Selection*, donde adecuadamente lo denomina "método de contabilidad". Sin embargo, la mayoría conoce los efectos medios bajo el rótulo de "genes egoístas", evocador del libro que Richard Dawkins publicó en 1976.

La visión de la evolución centrada en el gen interpreta que todo resultado de la evolución es adaptativo en el nivel génico. Sin embargo, incluso los teóricos del gen egoísta necesitan una manera de distinguir entre un gen para el impulso meiótico y un gen para el caparazón de una tortuga. Para discriminar entre tales casos, se ha incorporado el concepto de "vehículo de la selección". El individuo es el vehículo de la selección en el caso del caparazón de las tortugas, porque todos los genes de la tortuga están, en cuanto a su eficacia biológica, en el "mismo barco". El concepto de vehículo en el marco de la teoría del gen egoísta duplica la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN.

Lo importante es que la lógica de las muñecas rusas no es arbitraria. Resulta crucial para dotar de sentido a la expresión "por el bien del individuo" y para que, por extensión, lo adquieran las adaptaciones en todos lo niveles de la jerarquía biológica. Se han propuesto numerosas teorías para explicar la evolución del altruismo aparente y otras conductas de buena ciudadanía sin invocar la selección de grupo. Al examinar estas teorías en detalle, se ve que suelen basarse en comparaciones que se desvían

Mucho antes de que la ciencia existiera como una práctica cultural, se alababa ya el comportamiento de las abejas, ejemplo natural de individuos que actuaban por el bien del grupo.



5. EL IMPULSO MEIOTICO REVELA EL CONFLICTO DE INTERESES entre los organismos individuales y los genes que contienen. Unos genes de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* forman un complejo denominado *SD* (acrónimo en inglés de "distorsionador de la segregación"), gracias al cual aumenta su frecuencia a pesar de que son perjudiciales para las moscas portadoras. En los machos heterocigotos para *SD*, la mitad de los espermatozoides llevan los genes *SD* (marcado con "+" en el panel superior) y la otra mitad no los lleva ("–"). Los gametos "+" producen una sustancia citolítica "–", de modo que casi todo el esperma viable es "+". *SD* no afecta el desarrollo de los huevos en las hembras. Puesto que pocas células espermáticas "–" sobreviven, los genes *SD* se hallan sobrerrepresentados en la siguiente generación. El rasgo persiste a pesar de que los machos homocigóticos para los genes *SD* ("++") suelen ser estériles.

CORTESIA DE BARBARA L. THORNE, *Universidad de Maryland/American Scientist*

de la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN. Cuando se reformulan en los términos de la lógica de las muñecas rusas, precisan de la selección en el nivel de grupo.

Colonias de insectos eusociales

En ningún caso ha oscilado el péndulo del pensamiento científico con mayor amplitud que en el estudio de los insectos eusociales (hormigas, avispas, abejas y termes). Mucho antes de que la ciencia existiera como una práctica cultural, se alababa ya el comportamiento de las abejas, ejemplo natural de individuos que actuaban por el bien del grupo. William Morton Wheeler, reputado entomólogo, fue, en 1911, el primero en describir las colonias de insectos eusociales como "superorganismos".

De haber habido un solo fenómeno biológico que sobreviviese al rechazo de la selección de grupo, tendría que haber sido el de los insectos eusociales. Pero fue en éstos donde se centraron los intentos de reformular todos los acontecimientos evolutivos en términos de consecuencias de los actos y motivos individuales.

La clave de tal programa se escondía en la selección de parentesco, presentada en los años sesenta por W. D. Hamilton. Según la regla de Hamilton, una conducta altruista evolucionará si $br - c > 0$, donde c es el coste del altruismo, b la ganancia del beneficiario y r el coeficiente de relación genealógica, que toma valores de 0 (individuos no emparentados) a 1 (gemelos idénticos). Cuando se cumple la desigualdad, el acto altruista incrementará el número absoluto de copias del gen altruista. Por ejemplo, en algunos insectos sociales r puede llegar hasta 0,75, de modo que vale la pena pagar un coste de 1 si el beneficio de un compañero de la colonia es 1,33.

Andando el tiempo, Hamilton se percató de que aumentar el número de copias de un gen altruista no era lo mismo que aumentar la eficacia biológica de los altruistas respecto a los no altruistas del mismo grupo. En los años setenta, Hamilton reformuló su teoría, junto con George Price, mediante la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN. Para su sorpresa, descubrió que el altruismo era selectivamente desventajoso dentro de los grupos aun cuando los grupos estuvieran compuestos por parientes: sólo podía aparecer evolutivamente en la población total mediante la selección entre grupos. Aunque su regla seguía prediciendo cuándo se adquiría el altruismo en la población total, en el curso de la evolución, la teoría había dejado de constituir una opción *alternativa* a la selección de grupo; antes bien, ahora era *necesaria* la selección entre grupos. El coeficiente de parentesco, definido en un comienzo como la probabilidad de compartir genes idénticos por descendencia, ahora se interpretaba, más generalmente, como un índice de variación genética entre grupos. Cuando $r = 0$, los grupos se forman aleatoriamente. Cuando $r = 1$, los miembros de cada grupo son genéticamente idénticos y la selección natural se concentra, por entero, en el nivel del grupo.

Estos desarrollos deberían haber conducido a un resurgir inmediato de la teoría SMN en los setenta, pero un clima intelectual no se invierte fácilmente. Desde la perspectiva actual parece inevitable la aceptación de que la gran mayoría de los rasgos que hacen funcionar a las colonias de insectos sociales como unidades adaptativas derivan de la selección entre colonias. Algunos rasgos evolucionan por selección dentro de las colonias, pero tienden a perturbar la organización funcional en el nivel de la colonia.

En los sistemas autoorganizados, pequeños cambios en las normas de niveles inferiores suelen producir grandes cambios en el sistema conjunto.

Fábricas de insectos y fortalezas

Uno de los autores (E. O. Wilson) ha definido las colonias de insectos sociales como "una fábrica dentro de una fortaleza". Fábrica y fortaleza sugieren un diseño funcional en el nivel de grupo. La arquitectura física de un nido de termes, el sistema de castas de una colonia de hormigas, la respuesta defensiva de un nido de avispas y el sistema de búsqueda de alimento de una colonia de abejas son actividades comunales que pueden evaluarse por su eficacia colectiva, tal y como se evalúan las adaptaciones de los organismos. Por ejemplo: cuando se daña un nido de termes, las obreras corren para reparar la brecha, a semejanza de los tipos celulares que se aprestan a sanar la herida en la piel de un organismo.

¿Cómo creó la evolución la conducta de las termes? Una posibilidad es que la reparación del nido refleje la selección dentro de las colonias: los termes individuales con un genotipo que los predispone a la reparación sobreviven y se reproducen mejor que sus compañeros de la colonia con otros genotipos. Mucho más verosímil parece la selección entre colonias: aquellas colonias en las que es común el genotipo reparador de nidos tendrán mayor probabilidad de sobrevivir y reproducirse que el resto.

La selección por parentesco es intuitiva, pero muy engañosa si se la entiende como una alternativa a la selección entre colonias. También confunde respecto a la naturaleza de la variación entre grupos. La selección por parentesco supone que la semejanza de conducta es proporcional a la similitud genética; el único modo de que un grupo posea una conducta uniforme es que sea uniforme genéticamente.

Sin embargo, las adaptaciones en el nivel de la colonia de los insectos eusociales suele depender de principios de autoorganización; en cuya virtud, normas de conducta bastante simples, a escala individual, interaccionan para producir conductas adaptativas complejas a escala de colonia. En los sistemas autoorganizados, pequeños cambios en las normas de niveles inferiores suelen producir grandes cambios en el sistema conjunto. Como consecuencia, una variación genéticamente modesta entre colonias de insectos sociales puede producir una variación conductual grande en el nivel de la colonia y suministrar así materia prima para la selección entre colonias. Se requiere una correlación entre la variación genética y la fenotípica, pero no una gran cantidad de variación genética entre grupos (valores altos de r). Incluso la variación genética aleatoria ($r = 0$) puede bastar.

Se observan conductas sociales incipientes incluso en algunos insectos solitarios que no comparten la peculiar estructura de parentesco de los insectos eusociales. Abejas de algunas especies del género *Certatina* y *Lasioglossum* viven de ordinario solas, pero cuando se fuerza a los individuos a vivir juntos, espontáneamente se reparten sus tareas, sea la búsqueda de alimento, excavar túneles o proteger el nido. Cada abeja está ya programada para realizar dichas tareas, y cambia de una a otra cuando es necesario. Si una abeja se encuentra con otra que ya está realizando una tarea, cambia a otra tarea. Otra preadaptación para la vida social es la dominancia, que lleva a la división del trabajo en papeles reproductivos y no reproductivos cuando se fuerza a las abejas solitarias a estar juntas. Estas adaptaciones de insectos solitarios que construyen y aprovisionan nidos son como "resortes" listos para saltar a su conversión, con modificaciones menores, en adaptaciones a la vida en colonia.

La mente grupal

La idea de que un grupo posea una mente colectiva, que se diría perteneciente al mundo de la novela fantástica, se sigue directamente de la teoría SMN. La encontramos avalada con un detalle impresionante en las investigaciones sobre insectos sociales. Compárense un mono *rhesus* y una colonia de abejas en el momento de tomar una decisión. Se ha adiestrado al mono para que observe una serie de puntos que se mueven hacia la izquierda o hacia la derecha en la pantalla y siga con la cabeza la dirección en que avanzan la mayoría de los puntos. En su mente, algunas neuronas se excitan en respuesta a los puntos que se desplazan a la derecha y otras en respuesta a los que se mueven hacia la izquierda. La decisión se toma cuando una de estas clases de neuronas se excita por encima de un valor umbral.

La colonia de abejas ha evolucionado para evaluar sitios potenciales de anidación durante la fase de enjambre de su ciclo biológico. Los sitios de anidación de mayor calidad atraen a más exploradoras, y se toma una decisión cuando se alcanza un número umbral de exploradoras en uno de los sitios.

El proceso de toma de decisiones es similar en ambos casos: las abejas individuales desempeñan el mismo papel que las neuronas del simio.

Podrían citarse muchos ejemplos más de procesamiento distribuido de la información, de "mentes grupales", en los insectos sociales. Mayor interés incluso reviste el que la mente grupal no se limite a los insectos eusociales. Como se ha indicado, la selección entre grupos no requiere variación genética extrema entre grupos. En el caso del procesamiento de la información, los beneficios colectivos de

Los autores

David Sloan Wilson y **Edward O. Wilson** son biólogos dedicados al estudio de la evolución. David Sloan Wilson enseña biología y antropología en la Universidad Binghamton de Nueva York. Se doctoró por la Universidad estatal de Michigan. Edward O. Wilson es profesor y conservador de entomología del Museo de Zoología Comparada de la Universidad de Harvard, donde también se doctoró. Ha sido galardonado con la Medalla Nacional de la Ciencia de Estados Unidos, el premio Crafoord y dos premios Pulitzer.

tomar una sabia decisión pueden ser grandes con un coste pequeño dentro de los grupos. Incluso en individuos que compiten puede resultar provechoso tomar una acertada decisión colectiva sobre dónde buscar el alimento, proveyéndose así una tarta mayor por la que competir.

Los estudiosos de la evolución están identificando provisionalmente mentes grupales en especies muy dispares; así, el búfalo africano o el renacuajo del sapo americano. Los modelos teóricos relativos a la toma de decisiones por consenso suelen formularse en términos del interés propio, porque cada miembro del grupo sale ganando de la toma de buenas decisiones. Sin embargo, no hay diferencias en punto a eficacia biológica en una situación donde todos ganan. El uso de la comparación de las muñecas rusas de la teoría SMN hace evidente que la toma de decisión colectiva evoluciona gracias a la selección entre grupos.

Selección de grupo en el laboratorio

La selección de grupo puede estudiarse en el laboratorio. Se crea una población de grupos y se selecciona un rasgo del nivel de grupo, del mismo modo que se han venido seleccionando, a lo largo de los siglos y de forma artificial, rasgos deseados en mejora vegetal o animal. Estos experimentos muestran de manera casi invariable una respuesta a la selección de grupo. A menudo la magnitud de la respuesta es mayor de lo previsto, por el modo en que los sistemas autoorganizados amplían la variación fenotípica.

Williams Muir, de la Universidad Purdue, comparó dos tipos de selección para la producción de huevos en gallinas. Tenía unas gallinas en jaulas, varias en cada jaula. En el primer experimento, las gallinas más productivas de cada jaula criaron la siguiente generación (selección dentro de grupo). En el segundo experimento, todas las gallinas de las jaulas más productivas criaron la siguiente generación (selección entre grupos). En el primer experimento, las gallinas más productivas de cada jaula lo eran principalmente por su agresividad hacia las otras gallinas. Después de seis generaciones, se obtuvo una línea hiperagresiva de gallinas que se desplumaban unas a otras en incesantes ataques, con frecuencia letales. La producción de huevos cayó en picado en el transcurso del experimento, a pesar de que en cada generación se habían seleccionado las gallinas más productivas. En el segundo experimento, la selección entre grupos produjo líneas dóciles de gallinas: la productividad creció un 160 % en seis generaciones.

Los experimentos de laboratorio valen también para explorar la selección en el nivel de las comunidades integradas por varias especies ("multiespecíficas"). En los años noventa, Charles Goodnight, de la Universidad de Vermont, realizó una serie de ingeniosos experimentos con dos especies del escarabajo de la harina, *Tribolium castaneum* y *T. confusum*. Colocó igual número de escarabajos de las dos especies en unos frascos y los dejó que interactuaran y se reprodujesen durante varias semanas. Los frascos se ordenaron según la densidad de *castaneum*. Los frascos con mayor densidad se usaron como "padres" de una nueva generación. Aunque los frascos se seleccionaban según la densidad de una de las especies (el fenotipo en el nivel de la comunidad), ambas especies se transferían a lo largo de las generaciones como parte de una misma comunidad y cada frasco empezaba con el mismo número de cada especie. En otras palabras, la unidad de selección en el experimento era la comunidad en su conjunto.

Goodnight observó una respuesta a la selección en el nivel de la comunidad: el rasgo fenotípico (densidad de *castaneum*) aumentó a lo largo del experimento, en idéntico grado que si se hubiera seleccionado un rasgo individual. En una segunda ronda de experimentos, se formaron nuevas comunidades combinando la línea seleccionada de *castaneum* con la línea de *confusum* de la población original. En estas comunidades reconstruidas no aparecieron los rasgos que habían evolucionado. Así Goodnight demostró que la selección en el nivel de la comunidad había producido cambios genéticos en ambas especies, que interaccionaban de modo que aumentaba la densidad de *castaneum*.

Un experimento como éste no tendría nada de extraordinario en el nivel inferior de la jerarquía biológica. Si se selecciona *Drosophila* para la longitud del ala, por citar un rasgo, se esperará observar cambios en los genes de dos o más cromosomas. En el experimento de Goodnight la comunidad desempeña el papel del individuo en *Drosophila* y las dos especies de escarabajo evocan la interacción entre genes de cromosomas distintos.



CORTESIA DE BARBARA L. THORNE, *Universidad de Maryland/American Scientist*

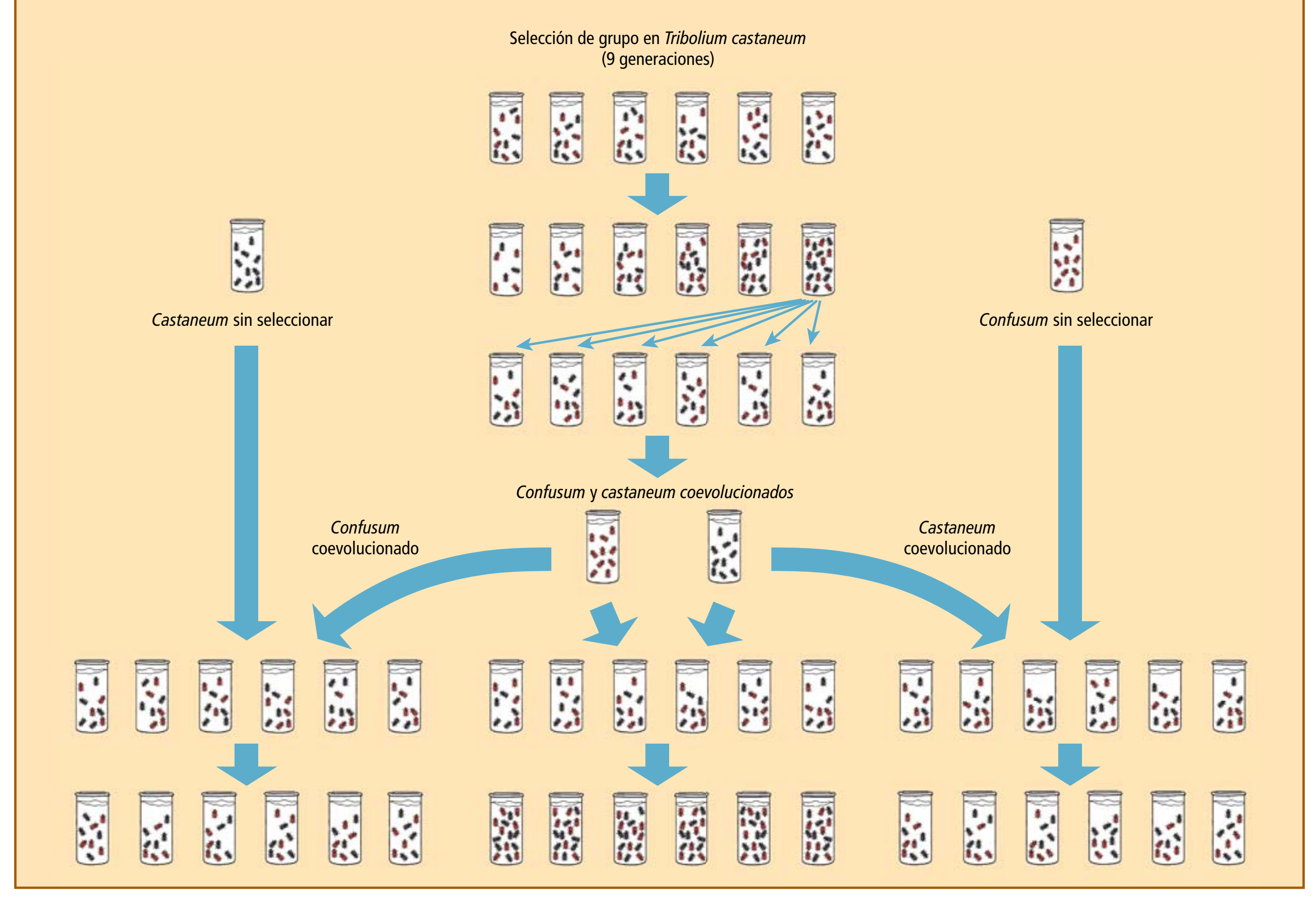
6. LA CONDUCTA COOPERATIVA DE LOS TERMES se explica más fácilmente mediante la selección en el nivel de la colonia que en el del individuo. La imagen muestra la construcción de un túnel que une un nido de termes en el laboratorio a una fuente de alimento. Los termes de la casta de los soldados, más pequeños y oscuros, se sitúan como centinelas: miran hacia fuera a lo largo de la nueva ruta. Mientras tanto, las obreras (mayores, con el abdomen de color más claro) alargan el túnel arqueado. No es probable que estas conductas aumenten la supervivencia de los termes respecto a las de sus compañeras de la colonia alejadas de los peligros de la zona de construcción. Sin embargo, las colonias con termes que construyen galerías cubiertas para protegerse mientras buscan el alimento poseen una clara ventaja respecto a las que no lo hacen. Los termes son de la especie *Nasutitermes corniger*.

William Swenson y uno de los autores (David Sloan Wilson) han estudiado un nivel de selección todavía mayor en experimentos con cultivos de ecosistemas microbianos *in vitro*. Cada tubo de ensayo se inoculó con millones de microorganismos procedentes de una misma fuente de agua para que la variación genética inicial entre los tubos de ensayo fuera despreciable. A pesar de ello, los tubos divergieron rápidamente entre sí en características mensurables, como el *p*H o la capacidad de degradar una sustancia tóxica. Esas características son propiedades del ambiente físico influido por procesos biológicos. Se fue seleccionando un rasgo asociado con el ecosistema entero, en vez de rasgos individuales o de una especie. Por otro lado, el procedimiento fue algo distinto de la selección de un rasgo individual, como la longitud del ala de *Drosophila*. Los ecosistemas con mayor puntuación en el rasgo fenotípico se seleccionaron para que fuesen "padres" de una nueva generación de ecosistemas. Hubo respuesta a la selección, lo que demostraba que en el nivel del ecosistema se dan variaciones fenotípicas heredables.

Parece que una versión no buscada de este experimento tuvo lugar durante una selección de cepas de levaduras y bacterias productoras de kéfir, una bebida parecida al yogurt. El rasgo fenotípico en el nivel del ecosistema era el sabor del kéfir y sus beneficios para la salud, que hacían que se prefiriera unos lotes a otros. En este caso no sólo se seleccionaba una comunidad microbiana multiespecífica, sino

SELECCION COMUNITARIA

LA SELECCION EN EL NIVEL DE LA COMUNIDAD quedó de manifiesto en los experimentos de Charles Goodnight, de la Universidad de Vermont. Se criaron juntas dos especies del escarabajo de la harina, *Tribolium castaneum* (*negro*) y *T. confusum* (*rojo*). Se las sometió a selección para que la densidad de *T. castaneum* fuese mayor. En una tanda preliminar de experimentos (*parte superior del diagrama*), los escarabajos de los frascos con mayor densidad se utilizaron como progenitores de la siguiente generación. Tras nueve iteraciones del procedimiento, la tendencia a vivir en altas densidades se convirtió en rasgo heredable: cuando los escarabajos de *castaneum* y *confusum* que habían coevolucionado en las poblaciones seleccionadas se incubaron juntos (*panel central*), continuaron manteniendo una alta densidad. Sin embargo, cuando los escarabajos coevolucionados de *confusum* se encerraron con insectos no seleccionados de *castaneum* (*panel izquierdo*), no se observó ningún aumento de la densidad; tampoco se vio ningún efecto cuando se juntaron *castaneum* coevolucionado y *confusum* sin seleccionar (*panel derecho*). La inferencia es que la selección produjo cambios genéticos que sólo se han expresado en la comunidad dual de especies, no en ninguna de ellas por separado.



STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

que la comunidad evolucionó hasta agregarse en grupos que se mantenían juntos gracias a una matriz de polisacárido: se podían dispersar entre lotes como una sola unidad.

Estos experimentos traen a primer plano la sugestiva posibilidad de crear grupos "diseñados", comunidades y ecosistemas que realicen funciones útiles, como la degradación de toxinas, mediante la utilización de los procedimientos de selección artificial que se vienen practicando con individuos desde hace muchos siglos. También alientan la búsqueda de ejemplos de selección natural a escala de comunidades y de ecosistema.

Evolución humana

Durante el último medio siglo han estado en boga las teorías de selección individual aplicadas a la conducta humana. Anteriormente se solía considerar a las sociedades humanas como un único organismo. La verdad es que la tradición funcionalista de las ciencias sociales tiene un gran parecido con la versión ingenua de la selección de grupo de la biología. Obviamente, la aplicación acrítica de los razonamientos que se fundamentan en "el bien del grupo" no se justifica más en los asuntos humanos que en otros; la selección de grupo prevalecerá sólo si es más fuerte que la selección dentro del grupo. Dicho esto, sin embargo, sostenemos también que la selección de grupo ha sido una fuerza muy poderosa en la evolución genética y cultural de la humanidad.

Líneas convergentes de datos hacen pensar que una diferencia clave entre los ancestros humanos y otras especies de primates fue la supresión de las diferencias de eficacia biológica dentro de los grupos; la selección se concentró en el nivel de grupo. Las sociedades cazadoras-recolectoras son igualitarias. La carne se comparte escrupulosamente; a los aspirantes a machos alpha se les pone en su sitio; las conductas en propio beneficio individual se censuran. Incapaces de medrar a expensas de otros, los miembros de los grupos cazadores-recolectores salen adelante gracias al trabajo en equipo.

La selección en favor del trabajo en equipo debió de empezar muy pronto en la evolución humana. Los bebés humanos señalan espontáneamente cosas a los otros, y no sólo para obtener lo que quieren, mientras que los chimpancés no lo hacen a ninguna edad. El pensamiento simbólico, el lenguaje y la transmisión social de información son actividades fundamentalmente comunitarias que dependen de que haya compañeros fiables. La explotación, el engaño y el vivir a costa ajena se dan en los grupos humanos, pero más notable es la medida en que se suprimen. Si estas conductas ensombrecen tanto nuestros pensamientos es precisamente por lo predispuestos que estamos a suprimirlas, como en un sistema inmunitario bien adaptado.

El trabajo en equipo permitió a nuestros precursores extenderse por toda Africa y más allá, reemplazando de paso a las demás especies de homínidos. Aunque constituimos una especie, nos hemos diversificado culturalmente para ocupar centenares de nicho ecológicos, nutriéndonos de cualquier cosa, desde las semillas hasta las ballenas. La invención de la agricultura añadió nuevas capas a la jerarquía biológica. Ahora vivimos en grupos de grupos de grupos.

Al considerar el panorama de la evolución genética y cultural humanas, ¿podemos pensar que las adaptaciones son "por el bien del grupo"? En cuanto recurrimos a la lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN, la respuesta es un sí rotundo. La idea de que la selección dentro del grupo triunfa irremediablemente sobre la selección entre grupos es tan absurda aplicada a nosotros mismos como aplicada a los insectos eusociales.

En el término medio

Los debates sobre adaptación y selección natural pueden llegar a resultar conflictivos y belicosos. El punto más difícil de alcanzar es el del medio. En los años setenta, con su metáfora de los tímpanos de san Marcos, Stephen Jay Gould y Richard Lewontin iniciaron un debate sobre la importancia de las adaptaciones, en comparación con meros subproductos de la evolución, que se polarizó innecesariamente. Una vez concluida la disputa, cuesta imaginar el alboroto que se armó. *Por supuesto* que hay tímpanos y *por supuesto* que hay adaptaciones. Que se trate de lo uno o de lo otro, habrá que determinarlo en cada caso.

La controversia sobre los niveles de selección empezó antes y todavía no se ha cerrado. Con su *Adaptation and Natural Selection,* Williams hizo un gran servicio y un flaco favor. El gran servicio consistió en defender enérgicamente que la adaptación en cualquier nivel precisa de una selección en ese mismo nivel. El flaco favor fue la adopción de un punto de vista extremo: "las adaptaciones en el nivel de grupo no existen".

Creemos que ha llegado el momento de proclamar la victoria del término medio. Los evolucionistas futuros se preguntarán a qué vino tanto debate. Claro está que la selección natural opera en múltiples niveles de la jerarquía biológica. La lógica de las muñecas rusas de la teoría SMN debe emplearse para evaluar la importancia de cada nivel caso por caso.

Bibliografía complementaria

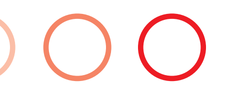
EXPERIMENTAL STUDIES OF COMMUNITY EVOLUTION. I: THE RESPONSE TO SELECTION AT THE COMMUNITY LEVEL. II: THE ECOLOGICAL BASIS OF THE RESPONSE TO COMMUNITY SELECTION. C. J. Goodnight en *Evolution*, vol. 44, págs. 1614-1636; 1990.

EVOLUTION OF COOPERATION AND CONFLICT IN EXPERIMENTAL BACTERIAL POPULATIONS. P. B. Rainey y K. Rainey en *Nature*, vol. 425, págs. 72-74; 2003.

KEFIR: A SYMBIOTIC YEASTS-BACTERIA COMMUNITY WITH ALLEGAD HEALTHY CAPABILITIES. F. Lopitz-Otsoa, A. Rementería, N. Elguezábal y J. Garaizar en *Revista Iberoamericana de Micología*, vol. 23, págs. 67-74; 2006.

TOMA DE DECISIONES EN ENJAMBRES. P. K. Visscher, T. Seeley y K. Passino en *Investigación y Ciencia*, n.º 360, págs. 8-18; 2006.

ONE GIANT LEAP: HOW INSECTS ACHIEVED ALTRUISM AND COLONIAL LIFE. E. O. Wilson en *BioScience*, vol. 58, n.º 1, págs. 17-25; 2008.



Cuatro falacias de la psicología evolutiva popular

Muchas afirmaciones de ciertos psicólogos evolutivos sobre la mente humana se han introducido ya en la cultura popular. Tan grandilocuentes declaraciones, sostienen otros, carecen de pruebas sólidas

• • • **DAVID J. BULLER**

CONCEPTOS BASICOS

- Entre los últimos legados de Charles Darwin se encuentra la idea de que la mente humana se constituyó como es gracias a algún proceso adaptativo.
- Una rama importante de la psicología evolutiva, la que aquí llamamos psicología evolutiva popular (PEP), muy controvertida, sostiene que el cerebro humano tiene muchos mecanismos especializados que aparecieron durante la evolución para resolver los problemas adaptativos de nuestros ancestros cazadores-recolectores.
- El autor y muchos otros especialistas sugieren que algunas premisas de la PEP son erróneas: que podamos conocer la psicología de nuestros antepasados de la Edad de Piedra, que podamos entender cómo evolucionaron los rasgos propiamente humanos, que nuestras mentes no han evolucionado mucho desde la Edad de Piedra y que los cuestionarios psicológicos aportan pruebas de las adaptaciones.

Charles Darwin no tardó en aplicar su teoría de la evolución a la psicología humana. Al libro sobre *El origen de las especies* (1859) le siguieron *La ascendencia del hombre* (1871) y *La expresión de las emociones en los animales y en el hombre* (1872). Desde entonces, la cuestión no ha sido si la teoría de la evolución puede o no arrojar luz sobre el estudio de la psicología, sino cómo lo hará. Pese a todo, hasta los años setenta y con el advenimiento de la sociobiología, no se realizó un esfuerzo concertado para descubrir de qué manera la evolución ha moldeado el comportamiento humano.

La idea central de la sociobiología era sencilla: el comportamiento ha evolucionado, a través de la selección natural y sexual (en respuesta a la competencia por la supervivencia y la reproducción, respectivamente), de igual modo que lo han hecho las formas orgánicas. La sociobiología ampliaba el estudio de la adaptación para que abarcase también el comportamiento humano.

Philip Kitcher, en su crítica a la sociobiología desarrollada en *Vaulting Ambition*, observaba que, si bien una parte de esta disciplina respaldaba prudentes afirmaciones con una adecuada investigación empírica, los resultados teóricos de la tendencia dominante excedían sobremanera el alcance de las pruebas empíricas. Kitcher llamó a esa tendencia "sociobiología popular" porque empleaba los principios evolucionistas "para proponer grandilocuentes afirmaciones sobre las instituciones sociales y la naturaleza humana" y estaba "pensada para atraer la atención general".

Los tiempos han cambiado. Aunque todavía quedan algunos autodenominados sociobiólogos, la moda actual es la psicología evolutiva. Según esta disciplina, la adaptación ha de buscarse en los mecanismos psicológicos que controlan los comportamientos y no en los comportamientos mismos. Pero, como en el viejo dicho de Jean-Baptiste Alphonse Karr, cuanto más cambian las cosas, más se quedan como estaban. Aunque algunos trabajos de psicología evolutiva respaldan afirmaciones prudentes con una investigación empírica adecuada, una de las ramas dominantes, la psicología evolutiva popular (PEP), ofrece afirmaciones grandilocuentes y ambiciosas sobre la naturaleza humana para consumo popular.

Los representantes más destacados de la PEP son los psicólogos David M. Buss (profesor de la Universidad de Texas en Austin y autor de *La evolución del deseo* y de *La pasión peligrosa*) y Steven Pinker (profesor de la Universidad de Harvard, entre cuyos libros se cuentan *Cómo funciona la mente* y *La tabla rasa*). Sus explicaciones populares se sustentan en el trabajo teórico de la a veces denominada escuela de Santa Bárbara de psicología evolutiva, encabezada por los antropólogos Donald Symons y John Tooby y la psicóloga

DEFINICION

En este artículo se entiende por psicología evolutiva popular (PEP) una rama de la psicología teórica que sustenta afirmaciones sobre la naturaleza humana en principios evolutivos y se orienta al consumo popular.

GRANT DELIN

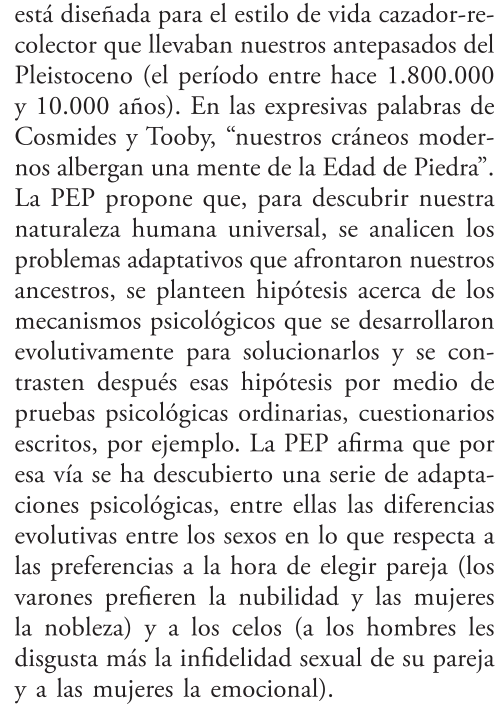


ESTE DIORAMA del Museo Americano de Historia Natural, de Nueva York, muestra cómo debían de vivir los hombres de la Edad de Piedra hace unos 15.000 años.

Leda Cosmides, los tres de la Universidad de California en Santa Bárbara.

Según la PEP, “el cerebro humano se compone de un gran conjunto de dispositivos computacionales, funcionalmente especializados, que aparecieron evolutivamente para resolver los problemas de adaptación con los que de modo regular se topaban nuestros antepasados cazadores-recolectores” (citado del sitio en la Red del Centro de Psicología Evolutiva de la Universidad de California en Santa Bárbara). Según la PEP, así como la evolución por selección natural y sexual ha dotado a todos los seres humanos de adaptaciones morfológicas —el corazón o el hígado—, también los ha dotado de un conjunto de adaptaciones psicológicas, u “órganos mentales”, entre las que figuran unos mecanismos psicológicos o “dispositivos computacionales, funcionalmente especializados” para el lenguaje, el reconocimiento facial, la percepción espacial, el uso de herramientas, la atracción y retención de pareja, el cuidado parental y una amplia variedad de relaciones sociales. En conjunto, estas adaptaciones psicológicas constituyen una “naturaleza humana universal”. Según este postulado, las diferencias individuales y culturales son resultado de la respuesta de nuestra común naturaleza a las circunstancias locales variables; igual que en un ordenador, las salidas de un programa son función de sus entradas. Excepciones notables a esta regla son las diferencias entre los sexos, que se generaron evolutivamente porque en ocasiones no fueron iguales los problemas adaptativos a que hubieron de enfrentarse hombres y mujeres.

Además, como la adaptación compleja es un proceso muy lento, la naturaleza humana



está diseñada para el estilo de vida cazador-recolector que llevaban nuestros antepasados del Pleistoceno (el período entre hace 1.800.000 y 10.000 años). En las expresivas palabras de Cosmides y Tooby, “nuestros cráneos modernos albergan una mente de la Edad de Piedra”. La PEP propone que, para descubrir nuestra naturaleza humana universal, se analicen los problemas adaptativos que afrontaron nuestros ancestros, se planteen hipótesis acerca de los mecanismos psicológicos que se desarrollaron evolutivamente para solucionarlos y se contrasten después esas hipótesis por medio de pruebas psicológicas ordinarias, cuestionarios escritos, por ejemplo. La PEP afirma que por esa vía se ha descubierto una serie de adaptaciones psicológicas, entre ellas las diferencias evolutivas entre los sexos en lo que respecta a las preferencias a la hora de elegir pareja (los varones prefieren la nubilidad y las mujeres la nobleza) y a los celos (a los hombres les disgusta más la infidelidad sexual de su pareja y a las mujeres la emocional).

Creo que la PEP sigue un derrotero equivocado. Sus ideas no adolecen tanto de un fallo determinado en los fundamentos cuanto de muchos errores menores. Aun así, la crítica reciente de la psicología evolutiva permite descubrir varios problemas generales de la PEP.

LA PEP DICE

que el análisis de los problemas adaptativos a que se enfrentaron nuestros ancestros de la Edad de Piedra, por ejemplo cómo competir por parejas y recursos, aporta claves para conocer el diseño de la mente.

PERO

sin conocer los rasgos psicológicos de nuestros ancestros —información que no poseemos— no podemos saber cómo la selección retocó estos rasgos para crear la mente del hombre actual.



FRANK STOCKTON

Primera falacia:

El análisis de los problemas adaptativos del Pleistoceno aporta claves sobre el diseño de la mente.

Tooby y Cosmides sostienen que, así como podemos dar por cierto que nuestros antepasados del Pleistoceno tenían que “seleccionar parejas de alta calidad reproductiva” e “inducir a sus parejas potenciales a elegirlos a ellos”, también podemos dar por cierto que aparecieron adaptaciones psicológicas evolutivas para resolver esos problemas. Pero cuando se intenta identificar los problemas adaptativos que impulsaron la evolución psicológica humana, se tropieza con un dilema irresoluble.

Por un lado, es cierto que nuestros ancestros, por ejemplo, tenían que “inducir a sus parejas potenciales a elegirlos a ellos”; sin embargo, esta idea resulta demasiado abstracta para que aporte alguna indicación clara acerca de la naturaleza de las adaptaciones de la psicología humana. Todas las especies se enfrentan al problema de atraer a sus parejas. Los pájaros jardineros macho construyen nidos, con decoraciones muy elaboradas, para exhibirse en ellos, el macho de los mecópteros, o moscas escorpión, ofrece presas capturadas y el carricerín común desgrana un variado repertorio de canciones. Para saber de qué estrategias se valían nuestros antepasados hace



falta una descripción mucho más detallada de su problema adaptativo.

Sin embargo, las descripciones más detalladas de los problemas de adaptación a que se enfrentaron nuestros ancestros se topan con la otra cara del dilema: no pasan de ser puras cábalas, pues apenas nos han llegado rastros de las condiciones en las que evolucionaron los primeros humanos. Los registros paleontológicos aportan algunas claves sobre ciertos aspectos de los inicios de la vida humana, pero dicen muy poco sobre las interacciones sociales, que debieron de tener capital importancia en la evolución psicológica del ser humano. Tampoco las poblaciones cazadoras-recolectoras actuales aportan muchas pistas sobre la vida social de nuestros ancestros. Los estilos de vida de estos grupos varían bastante, incluso entre quienes viven en las regiones de Africa donde habitaron los primeros humanos.

Además, como sostiene Richard Lewontin, de la Universidad de Harvard, los problemas adaptativos a que se enfrenta una especie no se pueden separar de las características y estilos de vida de la especie en cuestión. La corteza del árbol contribuye a los problemas adaptativos a que se enfrentan los pájaros carpinteros, pero no así las piedras que están al pie del árbol. Por el contrario, para los tordos, que usan piedras para romper el caparazón de los caracoles, las piedras son parte de los problemas adaptativos que encaran, mientras que la corteza del árbol no lo es. De igual manera, los procesos motivadores y cognitivos de nuestros ancestros habrían respondido selectivamente a ciertas características de los medios físico y social, y esta receptividad selectiva habría determinado el tipo de factores ambientales que condicionaron la evolución humana. Para identificar los problemas adaptativos que conformaron la mente humana, necesitamos saber algo sobre la psicología humana ancestral. Pero no sabemos nada.

Por último, aun cuando pudiéramos identificar con precisión los problemas adaptativos a que se enfrentaron nuestros precursores a lo largo de la historia evolutiva humana, no podríamos inferir gran cosa sobre la naturaleza de las adaptaciones psicológicas. La selección aporta soluciones a los problemas adaptativos conservando modificaciones de rasgos preexistentes. La adaptación posterior siempre se halla en función de cuánto se modificaron los rasgos previos. Para saber cómo se desarrolló la solución a un problema adaptativo se requiere saber algo sobre el rasgo previo que se utilizó y modificó para resolver el problema de marras. Sin el conocimiento de los rasgos psicológicos de nuestros ancestros —del que carecemos—, no podemos saber cómo los retocó la selección natural para crear la mente.


FRANK STOCKTON

LA PEP DICE

que sabemos o podemos descubrir por qué la evolución engendró rasgos genuinamente humanos, como el lenguaje.

PERO

para descubrir por qué la evolución engendró algún rasgo, tenemos que identificar las funciones adaptativas que éste cumplía entre los primeros humanos y de ello apenas hay prueba.

Falacia 2:

Sabemos, o podemos descubrir, por qué evolucionaron los rasgos propiamente humanos

Con frecuencia, la aplicación del método comparado al estudio de un clado, o grupo de especies que descienden de un precursor común, permite reconstruir las presiones selectivas que impulsaron la evolución de una determinada especie. Al descender de una forma común todas las especies del clado, cabe admitir que las diferencias entre ellas sean el resultado de las variaciones de los requerimientos ambientales que han sufrido. Cuando un rasgo lo comparten dos o más especies de un clado, pero no otras, es posible, a veces, identificar las demandas ambientales comunes a esas especies y ausentes en las especies sin el rasgo. Podemos identificar las exigencias ambientales a que está adaptado un rasgo estableciendo una correlación entre las diferencias de rasgos y variaciones ambientales concretas.

Pero el método comparado ofrece poca ayuda a las aspiraciones de la PEP de descifrar la historia adaptativa de los rasgos psicológicos —el lenguaje, formas superiores de cognición— que supuestamente constituyen la naturaleza humana. Pinker, por ejemplo, sostiene con elocuencia que el lenguaje es una adaptación para la comunicación verbal de complejidad combinatoria infinita. Probablemente tenga razón en que el lenguaje es una adaptación. Pero descubrir por qué apareció en la evolución, a qué exigencia constituye una adaptación, requiere determinar las funciones adaptativas que cumplió el lenguaje entre los primeros hablantes.

Para que pudiésemos valernos del método comparado a la hora de contestar ese tipo de

preguntas, necesitaríamos comparar algunos rasgos psicológicos con su forma homóloga en las especies con las que compartimos un ancestro común. Aquí es donde se presenta el problema. Entre las especies existentes, nuestros parientes más cercanos son el chimpancé y el bonobo, con los que compartimos un precursor común que vivió hará unos seis millones de años. Pero ni siquiera ellos, nuestros parientes más cercanos, poseen esos rasgos psicológicos complejos, como el lenguaje, cuya evolución aspira a explicar la PEP.

Determinar qué demandas ambientales compartimos con nuestros parientes más próximos no nos sirve, pues, para descubrir a qué se adaptaron nuestros rasgos psicológicos. Más bien necesitamos identificar las demandas ambientales que nos diferenciaron evolutivamente, durante los últimos seis millones de años, de nuestros parientes vivos más cercanos.

Sí podría ilustrarnos sobre estos procesos evolutivos algún tipo de información sobre la ecología y el estilo de vida de especies más estrechamente emparentadas con nosotros, con las que compartiésemos algunas capacidades cognitivas superiores. Quizá podríamos dar con demandas ambientales que nos hubiesen afectado tanto a ellas como a nosotros, pero desconocidas para el chimpancé y el bonobo (y otros primates). Las especies que reúnen tales condiciones son los demás homininos: los australopitecinos y las otras especies del género *Homo*.

Por desgracia, todos esos homininos se han extinguido; y los muertos no cuentan sus historias evolutivas [*véase* "Homínidos contemporáneos", de Ian Tattersall; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2000]. Escasean, pues, las pruebas necesarias para desentrañar la historia evolutiva de los rasgos propiamente humanos por medio del método comparado. (De ahí que haya varias teorías sobre la evolución del lenguaje, pero ninguna sugerencia acerca de cómo se podría discriminar entre ellas mediante pruebas empíricas.)

Lo que sí aporta a veces el método comparado es información sobre adaptaciones genuinamente humanas. Pero como ha apuntado Jonathan Kaplan, de la Universidad estatal de Oregón, esa información no se refiere a los rasgos universales de los humanos, sino a rasgos que aparecen sólo en algunas poblaciones humanas.

Sabemos, por ejemplo, que el alelo que produce (en quien tiene dos copias del alelo) la anemia drepanocítica o falciforme es, cuando se tiene sólo una copia, una adaptación que confiere resistencia a la malaria. La prueba se obtuvo al comparar poblaciones humanas portadoras del alelo con poblaciones humanas en que se halla ausente e identificar las demandas ambientales que guardaban correlación con la presencia del alelo. Como el método comparado ha detectado este tipo de adaptaciones fisiológicas, es razonable suponer que también podría encontrar algunas adaptaciones psicológicas. Pero eso no sirve de consuelo a la PEP, que proclama la universalidad de las adaptaciones psicológicas humanas. El método comparado reviste una magra utilidad para los rasgos universales y característicamente humanos. Por tanto, es improbable que las explicaciones evolutivas de nuestra supuesta naturaleza humana universal pasen alguna vez de especulaciones.

Falacia 3:
"El cráneo moderno aloja un cerebro de la Edad de Piedra"

La afirmación de la PEP de que la naturaleza humana se pergeñó durante el Pleistoceno, cuando nuestros antepasados vivían como cazadores-recolectores, es errónea en los dos cabos temporales de la era.

Algunos mecanismos psicológicos humanos emergieron, cierto, durante el Pleistoceno. Pero otros son vestigios de un pasado evolutivo más antiguo; los compartimos con algunos de nuestros parientes primates. Jaak Panksepp, de la Universidad estatal de Bowling Green, ha identificado siete sistemas emocionales en los humanos cuyos orígenes evolutivos son anteriores al Pleistoceno. Los sistemas emocionales que denomina Cuidado, Pánico y Juego se remontan a la historia evolutiva de los primates tempranos, mientras que los sistemas de Miedo, Rabia, Curiosidad y Deseo vienen de más atrás, de antes, incluso, de que hubiera mamíferos.

LA PEP DICE

que los humanos modernos alojamos una mente de la Edad de Piedra.

PERO

parece igual de probable que la mente humana tuviera que adaptarse a los grandes cambios que supuso el advenimiento de la agricultura y de la vida urbana. Si los humanos han experimentado cambios fisiológicos desde la Edad de Piedra, ¿por qué no podrían haber cambiado también en su psiquis?



FRANK STOCKTON

Cambia mucho la manera de entender la psicología humana cuando se tiene presente esa profundidad en el tiempo de nuestra historia evolutiva. Pensemos en el apareamiento humano. Buss sostiene que las estrategias de apareamiento humanas se moldearon durante el Pleistoceno para resolver los problemas adaptativos que decidieron el rumbo singular de la evolución humana. De ahí que suponga que comportamientos propios de los seres humanos, como el deseo de emparejarse tanto a corto como a largo plazo (permitiéndose en ocasiones breves infidelidades durante un emparejamiento estable), forman parte de un conjunto integrado de adaptaciones psicológicas que calculan inconscientemente los beneficios reproductivos de cada estrategia. Cuando los beneficios reproductivos potenciales de una relación a corto plazo son mayores que su coste potencial, esas adaptaciones conducen a la infidelidad.

El cuadro cambia cuando se tiene en cuenta que ciertos aspectos de nuestra psicología son remanentes de la historia evolutiva prehumana. Puesto que el chimpancé y el bonobo, nuestros parientes más cercanos, son especies muy promiscuas, nuestro linaje probablemente se embarcó en la etapa humana de su viaje evolutivo portando un mecanismo erótico diseñado para promover las relaciones promiscuas. Las características psicológicas que fueron luego surgiendo durante la historia evolutiva humana se construyeron sobre esos cimientos. Y sabemos que algunos sistemas emocionales evolucionaron después para promover la vinculación afectiva de pareja, generalizada entre las culturas humanas y ausente en los primates que nos son más cercanos. Sin embargo, no tenemos razones para pensar que los mecanismos del deseo sexual y la vinculación afectiva de pareja evolucionaron a la vez, como partes de una estrategia integral de apareamiento. Es más, probablemente evolucionaron como sistemas separados, en puntos distintos de la historia evolutiva de nuestro linaje, en respuesta a diferentes demandas adaptativas y para servir a propósitos dispares.

Si esta interpretación alternativa de la psicología del apareamiento humano es correcta, no contaríamos con "una sola mente" que determinase nuestras relaciones sexuales. Tendríamos impulsos psicológicos que compiten entre sí. Antiguos mecanismos evolutivos eróticos nos empujarían hacia la promiscuidad y sistemas emocionales más recientes nos empujarían hacia unas relaciones de pareja estables. No nos guiaría una psicología del Pleistoceno integrada, que calcula inconscientemente qué impulso seguir y cuándo; nos desgarrarían mecanismos emocionales opuestos que habrían evolucionado por separado.

La idea de que "nuestro cráneo moderno aloja una mente de la Edad de Piedra" también es errónea en lo que toca al cabo contemporáneo de nuestro hilo evolutivo. La noción de que estamos atascados en una psicología adaptada al Pleistoceno subestima sobremanera la velocidad a la que la selección natural y sexual puede impulsar el cambio evolutivo. La investigación reciente ha demostrado que la selección puede alterar radicalmente rasgos de una población en sólo 18 generaciones (en los humanos, unos 450 años).

Tan rápida evolución ocurre, por supuesto, sólo cuando se dan cambios significativos en las presiones selectivas que operan sobre una población. Pero las transformaciones ambientales acaecidas desde el Pleistoceno han alterado, sin duda, las presiones selectivas sobre la psicología humana. Las Revoluciones Agrícola e Industrial precipitaron cambios fundamentales en las estructuras sociales de las poblaciones humanas, lo que a su vez modificó las dificultades a que se enfrentan los humanos cuando adquieren recursos, se aparean, forman alianzas o se distribuyen en categorías dentro de una jerarquía.

Otras actividades humanas —que van de la construcción de refugios a la conservación de alimentos, de la anticoncepción a la educación reglada— también han alterado sistemáticamente las presiones selectivas. Dados los numerosos ejemplos incontrovertibles de adaptaciones fisiológicas a demandas ambientales de nuevo cuño una vez pasado ya el Pleistoceno (piénsese en la resistencia a la malaria), no hay por qué dudar de una evolución psicológica similar.

Además, las características psicológicas humanas son el producto de un desarrollo durante el cual los genes interaccionaron con el medio. Aun cuando hubiese apenas habido evolución genética desde el Pleistoceno, lo que es dudoso, no por ello habrían dejado los ambientes humanos de haber cambiado muchísimo, como indican los ejemplos mencionados. Cualquier gen que se seleccionase en el Pleistoceno interactuará con estos nuevos ambientes para producir rasgos psicológicos que pueden diferir significativamente de aquellos de nuestros ancestros del Pleistoceno. Por tanto, no existen razones de peso para creer que todas nuestras características psicológicas evolucionadas siguen adaptadas al estilo de vida de los cazadores-recolectores del Pleistoceno.

Falacia 4:

Los datos psicológicos aportan pruebas claras de la PEP

La PEP sostiene que sus especulaciones sobre nuestro pasado pleistoceno han llevado al des-

ALGUNAS PUBLICACIONES DE LA PSICOLOGIA EVOLUTIVA POPULAR

The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture. Dirigido por Jerome H. Barkow, Leda Cosmides y John Tooby. Oxford University Press, 1992.

The Language Instinct. Steven Pinker. Harper Perennial, 1994.

The Murderer Next Door: Why the Mind is Designed to Kill. David M. Buss. Allyn y Bacon, 2007.

Evolutionary Psychology: The New Science of the Mind. David M. Buss. Allyn y Bacon, 2007.

El autor

David J. Buller, que enseña filosofía en la Universidad del Norte de Illinois, ha sido premiado por ésta con su mayor distinción, una "cátedra presidencial de investigación". Es autor de *Adapting Minds: Evolutionary Psychology and the Persistent Quest for Human Nature* (MIT Press; 2005) y coordinador de *Function, Selection and Design* (SUNY Press, ciclos de filosofía y biología; 1999).

cubrimiento de muchas de las adaptaciones psicológicas que controlan nuestro comportamiento. El planteamiento, pues, ha funcionado; debe de andar bien encaminado.

Ni que decir tiene que la solidez de semejante argumentación dependerá de la fuerza de las pruebas que avalan los descubrimientos que la PEP asegura haber logrado. Esas pruebas suelen consistir en datos de tests psicológicos por escrito (cuestionarios donde hay que elegir entre respuestas prefijadas), aunque a veces se presentan también conjuntos limitados de datos relativos al comportamiento.

Sin embargo, como he mostrado *in extenso* en mi *Adapting Minds*, la mayoría de las veces las pruebas no son concluyentes, y eso en el mejor de los casos. Como dijo con cierta sorna Robert Richardson, de la Universidad de Cincinnati, las hipótesis evolutivas preferidas de la PEP son "especulaciones disfrazadas con resultados". La impresión de que las pruebas son convincentes no la crean tanto los datos en sí, sino el que se pasen por alto y no se contrasten adecuadamente otras explicaciones viables. Veamos un sencillo ejemplo.

Buss sostiene que los celos evolucionaron a modo de alarma emocional que avisa de las potenciales infidelidades de una pareja. Provocarían un comportamiento orientado a minimizar pérdidas en los esfuerzos invertidos para la reproducción. Entre nuestros antepasados, continúa el argumento, las infidelidades suponían costes reproductivos diferentes para cada sexo. Para los hombres, una infidelidad *sexual* significaba que podían estar invirtiendo los recursos parentales en la descendencia de otro macho. Para las mujeres, era la relación *emocional* del varón con otra mujer lo que podría llevar a la pérdida de los recursos proporcionados por el varón. Y, en efecto, Buss afirma haber descubierto la diferencia sexual requerida en el "diseño" evolutivo de la mente celosa: la mente masculina es más sensible a los indicios de infidelidad sexual, mientras que la mente femenina es más sensible a los signos de una infidelidad afectiva.

Los principales datos citados en apoyo de esta teoría son las respuestas a unos cuestionarios de respuesta prefijada. En uno de los puntos del cuestionario, por ejemplo, se pregunta a los sujetos qué encuentran más turbador, "imaginarse a su pareja creando unos lazos emocionales profundos" con un rival o "imaginarse a su pareja disfrutando de un acto sexual apasionado" con un rival. Los resultados muestran sistemáticamente que hay más hombres que mujeres que encuentran más turbadora la infidelidad sexual de su pareja que la emocional.

Pero estos datos son pruebas sin solidez ("tomadas con pinzas") de adaptaciones psicológicas diferenciadas por sexos. Ambos sexos podrían tener la misma capacidad evolutiva para distinguir las infidelidades amenazadoras de las que no lo son y para sentir celos hasta un grado proporcional a la amenaza percibida para una relación en la que se ha invertido esfuerzo. Esa capacidad que ambos sexos compartirían habría generado los resultados diferenciados del cuestionario de Buss porque, con el tiempo, habríamos adquirido la creencia de que existen diferencias ligadas al sexo en el tipo de comportamiento que representa una amenaza para la relación. Así, según varios estudios, está muy extendida la opinión, en ambos sexos, de que los hombres son más proclives que las mujeres a mantener relaciones sexuales sin implicarse afectivamente. En coherencia con ese juicio, a los hombres les parecerá más amenazadora la infidelidad sexual de una mujer que a una mujer la infidelidad sexual de un hombre, porque la infidelidad sexual femenina es más proclive a venir acompañada de una implicación afectiva.

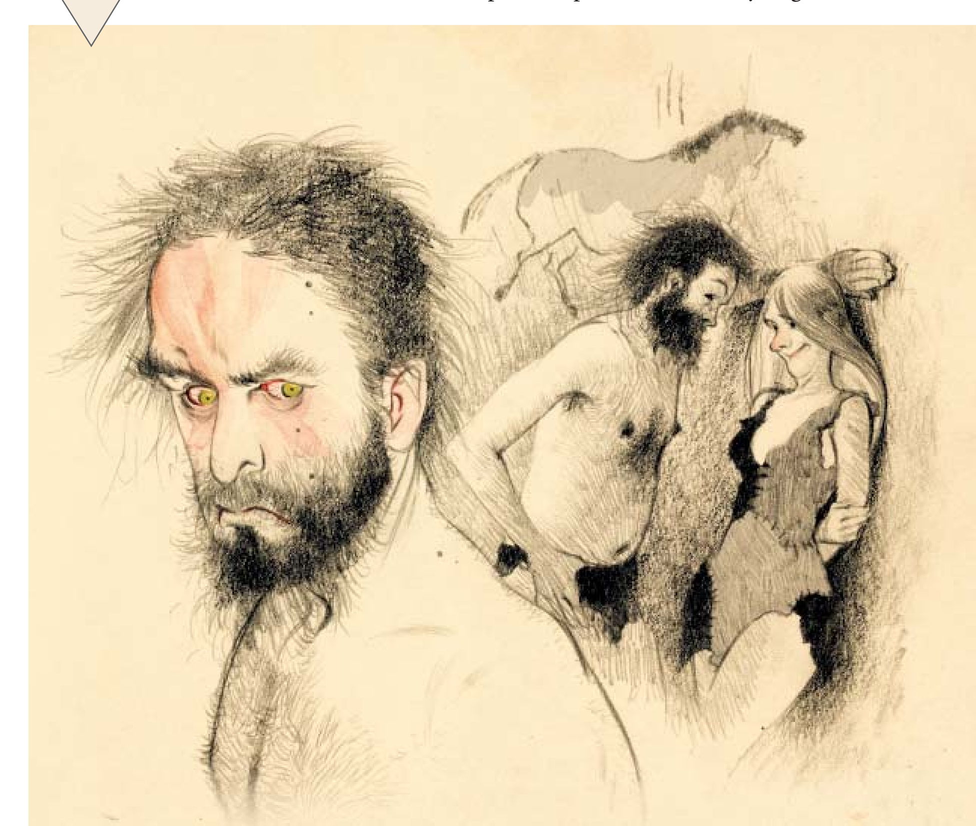
Esta hipótesis alternativa también explica a la perfección otros datos que no encajan fácilmente en la teoría de que las características evolutivas de la mente son distintas en razón del sexo. En primer lugar, los varones homosexuales son incluso menos proclives que las mujeres heterosexuales a encontrar la infidelidad sexual más turbadora que la emocional. Los varones homosexuales son también menos proclives que los varones y mujeres heterosexuales a creer que la infidelidad sexual representa una amenaza contra la relación principal. Si ambos sexos comparten la misma capacidad para sentir celos, y el grado

LA PEP DICE

que los datos psicológicos aportan pruebas claras de lo que asevera; así, por ejemplo, acerca de diferencias entre hombres y mujeres en el origen de los celos.

PERO

en su mayoría, los datos se basan en cuestionarios con respuestas prefijadas (*véase el recuadro* "Cuestionario de la PEP"). Estas pruebas no son concluyentes. No aportan indicios claros que lleven a pensar que los celos evolucionaron de forma distinta en hombres y mujeres. Antes bien, los celos podrían basarse en ambos sexos en un mismo mecanismo, que responde de forma distinta cuando el emparejamiento se enfrenta a diferentes tipos de amenazas.



FRANK STOCKTON

de los celos sexuales viene dado por el grado de la amenaza percibida para una relación, es normal que la tendencia de los varones homosexuales a no encontrar la infidelidad sexual amenazadora les haga apartarse de la norma masculina.

En segundo lugar, el grado en que los varones encuentran turbadora la posibilidad de la infidelidad sexual de una pareja femenina varía significativamente entre culturas. A este respecto, sólo una cuarta parte de los varones alemanes afirman que la infidelidad sexual es más turbadora que la emocional. Curiosamente, el propio Buss y sus colegas declaran que la cultura alemana tiene "actitudes más relajadas acerca de la sexualidad, incluso acerca del sexo extramarital, que la cultura norteamericana". Por tanto, los varones alemanes deberían ser menos proclives que los estadounidenses a creer que la infidelidad sexual de una pareja femenina amenaza una relación y, por tanto, ser menos proclives a que los perturbe la infidelidad sexual que los estadounidenses. Una vez más, esta diferencia cultural es precisamente la que debemos esperar si el grado de los celos sexuales se halla en función del grado en que la infidelidad sexual se percibe como amenaza a una relación.

No está claro por qué la PEP se resiste a la idea de que los sexos comparten el mismo mecanismo emocional de los celos y las diferencias de actitud derivan de las diferencias en las creencias que procesa ese mecanismo. Según la PEP, muchas diferencias culturales son producto de una naturaleza común que responde a condiciones locales variables. Aun así, las diferencias culturales son a menudo más profundas que esas diferencias sexuales que la PEP ha convertido en teoría sensacionalista. Si la variación cultural emerge de una naturaleza compartida que responde a estímulos distintos, emergen también las diferencias sexuales en lo concerniente a actitudes y comportamiento.

Coda

Uno de los legados perdurables de Darwin es la idea de que la mente humana se adquirió en el curso de la evolución a través de un proceso adaptativo. Al fin y al cabo, resulta más costoso hacer funcionar el cerebro humano que un motor de combustión interna, ya que el cerebro consume el 18 por ciento de la energía del cuerpo aunque constituye escasamente el 2 por ciento de su peso. No tendríamos semejante órgano si no hubiera desempeñado funciones adaptativas importantes en nuestro pasado evolutivo.

Lo difícil para la psicología evolutiva es pasar de este hecho general a los detalles específicos, sustentados empíricamente, del proceso adaptativo que conformó la mente. Ahora bien, según hemos visto, escasean las pruebas que puedan confirmar las teorías sobre las adaptaciones que ha experimentado nuestro linaje durante los últimos dos millones de años. Y no parece probable que tales pruebas se materialicen algún día; las que pudo haber se han perdido, quizá para siempre. No resulta fácil, cierto, aceptar que hay muchas cosas sobre la evolución de la mente humana que nunca conoceremos y sobre las que sólo podremos especular.

Por supuesto, algunas cábalas son peores que otras. Las de la PEP andan profundamente erradas. No parece que seccionar nuestra historia en el Pleistoceno en distintos problemas adaptativos, suponer que la mente se divide en soluciones independientes a esos problemas y apoyar semejantes supuestos con datos de cuestionarios escritos nos vaya a enseñar mucho acerca de nuestro pasado evolutivo. El campo de la psicología evolutiva tendrá que hacerlo mejor. Pero incluso aunque lo hiciera lo mejor posible, puede que jamás nos desvele por qué evolucionaron nuestras complejas características psicológicas.

Cuestionario de la PEP

Para evaluar las diferencias entre ambos sexos en cuanto a los celos, David M. Buss y sus colaboradores diseñaron un cuestionario (*abajo*) al que respondieron estadounidenses ("Sex Differences in Jealousy: Evolution, Physiology, and Psychology", en *Psychology Science*, vol. 3, núm. 4; julio 1992). Su cuestionario, o una variante, se utilizó posteriormente en estudios similares en otras sociedades. Los resultados se muestran en las tablas inferiores; la primera columna de cada tabla enumera los datos obtenidos por Buss y sus colaboradores en el estudio original.

Cuestionario

Instrucciones: Por favor, piense en una relación romántica seria y comprometida que haya tenido en el pasado, que tiene ahora o que le gustaría tener. Imagine que descubre que la persona implicada en esa relación se interesa por una tercera. ¿Qué le afligiría o turbaría más? (elija sólo una respuesta y rodéela con un círculo):

DILEMA 1

(A) Imaginarse a su pareja creando unos lazos emocionales profundos con esa persona.

(B) Imaginarse a su pareja disfrutando de una relación sexual apasionada con esa otra persona.

DILEMA 2

(A) Imaginarse a su pareja intentando posiciones sexuales diferentes con esa otra persona.

(B) Imaginarse a su pareja enamorándose de esa otra persona.

RESULTADOS DEL SONDEO

Porcentaje que ha elegido la infidelidad sexual (B) como más turbadora en el dilema 1

	EE.UU.	EE.UU.	EE.UU.	EE.UU.	EE.UU.	EE.UU.	China	Holanda	Alemania	Corea	Japón	Promedio
Varón	60	76	61	55	53	73	21	51	28	59	38	51
Mujer	17	32	18	32	23	4	5	31	16	18	13	22

Porcentaje que ha elegido la infidelidad sexual (A) como más turbadora en el dilema 2

	EE.UU.	EE.UU.	EE.UU.	EE.UU.	Holanda	Alemania	Corea	Japón	Promedio
Varón	44	43	44	47	23	30	53	32	38
Mujer	12	11	12	12	12	8	22	15	13

Bibliografía complementaria

THE SEVEN SINS OF EVOLUTIONARY PSYCHOLOGY. Jaak Panksepp y Jules B. Panksepp en *Evolution and Cognition*, vol. 6, n.º 2, págs. 108-131; 2000.

HISTORICAL EVIDENCE AND HUMAN ADAPTATIONS. Jonathan Michael Kaplan en *Philosophy of Science*, vol. 69, n.º 53, págs. 5294-5304; 2002.

EVOLUTIONARY PSYCHOLOGY AS MALADAPTED PSYCHOLOGY. Robert C. Richardson. MIT Press, 2007.

EVOLUTIONARY PSYCHOLOGY. Stephen M. Downes en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Edición de primavera; 2008.



La evolución en la vida cotidiana

La evolución, de la que cada vez sabemos más, está inspirando aplicaciones prácticas de interés para la sanidad pública, el cumplimiento de las leyes, la conservación de la naturaleza y la optimización de diseños

• • • DAVID P. MINDELL

No habría podido barruntar Darwin los avances técnicos que sus estudios sobre las abejas y las aves iban a suscitar. Los progresos en el conocimiento de la historia de la evolución y de sus mecanismos han desembocado en poderosas aplicaciones para un amplio abanico de especialidades.

Ahora, por ejemplo, los agentes de la ley recurren a menudo a análisis evolutivos en sus investigaciones, como ha popularizado la serie CSI. El conocimiento de la evolución de diferentes genes determina la clase de información forense que se puede extraer de las pruebas de ADN.

En el caso de sanidad pública, el análisis filogenético, o estudio de las secuencias de ADN para inferir su grado de parentesco evolutivo, de patógenos como la gripe aviaria o el virus del Nilo Occidental tal vez lleve a la preparación de vacunas y el establecimiento de directrices sanitarias que minimicen su transmisión al hombre. Un proceso de laboratorio, la "evolución dirigida", que acelera la evolución de las proteínas, puede servir para mejorar vacunas y otras proteínas útiles.

En las ciencias de la computación se han adaptado conceptos y mecanismos propios de la evolución para crear un sistema general, la programación genética, con el fin de resolver complejos problemas de diseño y de optimización. Y una metodología reciente, la metagenómica, ha cambiado profundamente la manera en que se catalogan los microorganismos de una región; nuestra concepción de la diversidad microbiana no había cambiado tanto desde la invención del microscopio.

Hace unos 400 años, Francis Bacon, estadista y filósofo inglés, dijo que el conocimiento es poder. Todas estas técnicas utilísimas, fruto de que se sepa cada vez más de los procesos evolutivos, le dan la razón.

Más allá de la duda razonable

Los análisis evolucionistas y las investigaciones criminales comparten un objetivo común: la revelación de acontecimientos históricos. Su fructífera combinación sólo hubo de esperar a que madurasen las técnicas de secuenciación

CONCEPTOS BASICOS

- La teoría de la evolución le proporciona a la humanidad mucho más que una mera narración científica sobre los orígenes y desarrollo de la vida. También fructifica en avances técnicos de valor incalculable.
- Pensemos en la noción de reloj molecular, basada en la acumulación de mutaciones en el ADN a lo largo de millones de años; resulta fundamental para los análisis de ADN utilizados en las investigaciones policiales.
- El análisis mediante el ADN de la evolución de los patógenos proporciona útiles informaciones para combatir brotes infecciosos y la difusión de enfermedades. La evolución acelerada en laboratorios ha permitido obtener vacunas más perfectas, así como otras proteínas terapéuticas.
- La ciencia del cómputo ha adaptado mecanismos de mutación y selección propios de la evolución para la resolución de problemas.





JEN CHRISTIANSEN

de ADN para aportar grandes conjuntos de datos, métodos cuantitativos robustos y una integración informada de la ciencia y la ley.

Al igual que tantas otras aplicaciones de la evolución, la noción de reloj molecular desempeña aquí un papel crucial. Se fundamenta en que las alteraciones de las secuencias de ADN se producen a ritmos aproximadamente predecibles (*véase el recuadro* "Relojes moleculares"). Sin embargo, los relojes correspondientes a diferentes regiones de ADN pueden marchar con ritmos bien diferentes. Hace unos veinticinco años, los genéticos descubrieron en el ADN humano regiones que evolucionan muy deprisa. No se tardó en convertirlas en marcadores genéticos —elementos de identificación unívoca de los individuos, como las huellas dactilares, pero mucho más detalladas— que ayudan a esclarecer crímenes o comprobar paternidades.

Los investigadores forenses evalúan marcadores genéticos específicos, que vinculen a individuos sospechosos con indicios obtenidos en la escena del delito, valiéndose de un cabello, de células epidérmicas labiales adheridas a un bote de cerveza, de la saliva pegada a sobres o a colillas, del semen, la sangre, la orina o las heces. El uso más inmediato consiste en demostrar la inocencia de un sospechoso cuyos marcadores no casan con las pistas obtenidas en la escena del crimen. Según el Proyecto Inocencia, que promueve y persigue el uso de marcadores genéticos para invalidar sentencias erróneas de los tribunales, la discordancia de marcadores genéticos ha exonerado desde 1989 a más de 220 personas, muchas de ellas condenadas por delitos de violación e incluso algunas que se encontraban en el corredor de la muerte.

El lugar que la ciencia de la evolución ocupa en el sistema judicial estadounidense ha cambiado radicalmente desde 1925, cuando la teoría de la evolución fuera presentada como un insidioso azote durante el juicio de John Scopes, profesor de secundaria de Tennessee. En 1998, en la vista de un caso criminal, *el estado de Louisiana contra Richard J. Schmidt*, el juez sentó precedente al dictaminar que los análisis filogenéticos cumplían los requisitos de una prueba judicial, pues eran susceptibles de verificación empírica, las investigaciones pertinentes se habían publicado tras revisión por pares y los aceptaba la comunidad científica (éstos son algunos de los criterios comúnmente conocidos como "normas de Daubert de la validez científica", así llamadas por el nombre del querellante en un caso anterior que también sentó precedente).

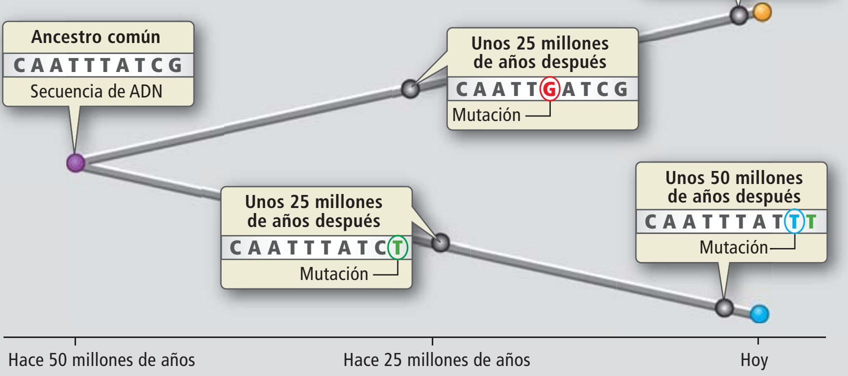
Tuve la fortuna de que se me invitase a intervenir en la vista de *Lousiana contra Schmidt* en condición de científico y testigo experto a petición de Michael L. Metzker, del Colegio Baylor de Medicina, y de David Hillis, de la Universidad de Texas en Austin. Los tres colaboramos en los análisis moleculares.

Los hechos, que nadie negaba, eran los siguientes: un gastroenterólogo penetró en el domicilio de una ex amante, que había sido enfermera en su consulta, y le puso una inyección. El médico decía que se trataba de vitamina B; ella, que fue de VIH, el virus del sida. La mujer había empezado a sentirse enferma, varios meses después de haber recibido la inyección; un análisis de sangre demostró que se



Relojes moleculares

Uno de los conceptos de la teoría evolutiva más útiles en las aplicaciones prácticas lo representa el reloj molecular, en el que un tramo de ADN acumula mutaciones a un ritmo lo suficientemente regular como para que mida cuánto tiempo hace que dos especies empezaron a divergir de un antepasado común.



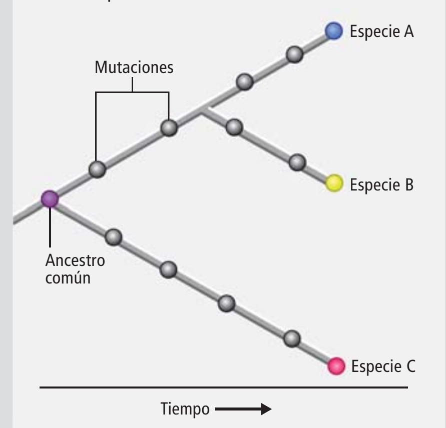
Un tictac de mutaciones

En el ejemplo, dos especies tuvieron un antepasado común hace 50 millones de años; la secuencia de ADN correspondiente a un gen particular compartido por ambas adquiere un cambio cada 25 millones de años. Hoy, pues, ese tramo de ADN de ambas especies diverge en cuatro lugares. Si se conoce la tasa de mutación (deduciéndola de genes y de pruebas fósiles de especies emparentadas de cerca) podremos inferir el intervalo de 50 millones de años a partir de las cuatro diferencias en el ADN observadas en el presente.

Ancestro común
CAATTTATCG
Especie moderna 1
CACTTGATCG
Especie moderna 2
CAATTTATTT

Arboles evolutivos

Es posible aplicar la técnica de los relojes moleculares a un grupo de especies emparentadas con el fin de inferir su filogenia o árbol evolutivo. En este ejemplo, los ADN de las especies A y B discrepan en cuatro lugares, mientras que cada uno de ellos difiere en ocho lugares del ADN de C. Así pues, el linaje de la especie C se escindió del antepasado común a las especies A y B hace, aproximadamente, el doble de tiempo que los linajes individuales de A y B. A, B y C podrían también representar cepas de un virus que mutasen en el intervalo de unos pocos años.



hallaba infectada con VIH. Acudió a la oficina del fiscal del distrito para presentar una denuncia. La policía judicial obtuvo rápidamente una orden de registro de la consulta del médico, donde se incautaron de sus libros de notas y de un vial con sangre, que guardaba en un refrigerador. El médico afirmó que conservaba la muestra de sangre, que le había extraído a un paciente seropositivo, para investigar.

El paso siguiente consistió en efectuar análisis filogenéticos de los linajes del VIH tomados de la enfermera y de la presunta fuente. Metzker, Hillis y yo seleccionamos dos genes de VIH para secuenciarlos, uno de ellos, de evolución relativamente rápida, el que codificaba parte de la envoltura vírica (*env*), el otro, mucho más lento, el de una enzima fundamental, la transcriptasa inversa (TI). Tomamos asimismo muestras de sangre de otros 30 individuos seropositivos, que habrían de servir como punto de referencia.

Nuestros análisis del gen *env* pusieron de manifiesto que las secuencias de VIH correspondientes a la víctima y a la muestra que conservaba el médico formaban dos clados hermanos con respecto a la muestra epidemiológica (*véase la figura 1*). Es decir, la probabilidad de que dos personas tomadas al azar en la población de seropositivos se hallasen infectadas por virus tan similares es extraordinariamente pequeña. Este resultado concordaba con que el médico hubiese utilizado la muestra de sangre extraída de uno de sus pacientes para infectar a la enfermera. No obstante, cabía la posibilidad de que ese paciente se hubiera infectado con VIH de la enfermera. La filogenia inferida de las secuencias de la TI, cuya evolución es más lenta, hacían ver que los virus tomados de la víctima eran más jóvenes, surgidos del seno del clado originado en la fuente presunta. Este resultado indicaba claramente que la presunta fuente había infectado a la enfermera.

El jurado declaró al médico culpable de tentativa de asesinato y fue sentenciado a 50 años de cárcel. No es posible, desde luego, saber cuánta importancia atribuyeron los jurados a las pruebas evolutivas y cuánta a otros aspectos, como los cuadernos de notas del médico o su conducta. Pero sí sabemos que los análisis filogénicos se seguirán utilizando en los tribunales estadounidenses gracias a que el Tribunal Supremo de los EE.UU. confirmó el precedente de *Louisiana contra Schmidt* en 2002.

Carreras armamentísticas microbianas

A lo largo de toda la historia de *Homo sapiens*, han coevolucionado con él toda clase de virus, bacterias, hongos y animales parasitarios. Esa interacción ha guiado la evolución de nuestro sistema inmunitario, maravillosamente adaptable. Las poblaciones humanas proporcionan cada vez un mayor campo para que medren los patógenos microbianos; y aun cuando seamos capaces de mantener a raya, e incluso extinguir, unos cuantos de ellos, otros evolucionarán, nos invadirán y se propagarán. Esta carrera de armamentos va para largo.

EVOLUCION DE LA ALTA VELOCIDAD

Entrenar a un robot para que deambule a la máxima velocidad posible requiere una laboriosa puesta a punto de su marcha para cada nueva superficie que deba recorrer. Pero investigadores de la Universidad Carnegie-Mellon se han valido para esta tarea de un algoritmo evolutivo. Lo han aplicado a Aibos, un perro mecánico de Sony. Se ensayaron en el robot distintas formas de marcha; sus velocidades se registraron en un ordenador, que seleccionó las mejores formas de deambulación y generó después una "descendencia" de marchas mutantes. Al cabo de 100 generaciones de este proceso evolutivo, los robots cuadrúpedos podían desplazarse un 20 por ciento más rápidamente de lo conseguido por los esfuerzos de afinarlos "a mano".

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: "MOLECULAR CLOCKS", DE UNDERSTANDING EVOLUTION WEB SITE, MUSEO DE PALEONTOLOGIA DE LA UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, 2008 (*http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/moleclocks_01*)

Conocer la historia evolutiva de los patógenos presupone la determinación de su genealogía, a menudo basada en análisis filogenéticos de ADN, el método más perfecto disponible para la identificación de patógenos desconocidos y de sus genes. Descifrar la genealogía de un patógeno permite elaborar valiosas hipótesis de trabajo sobre sus medios de reproducción y transmisión, así como sobre su hábitat preferido, pues es más probable que parientes cercanos compartan rasgos vitales heredables que los parientes lejanos. Podemos, a su vez, valernos de esta información crucial para formular recomendaciones encaminadas a minimizar las ocasiones de transmisión del patógeno y, de paso, reforzar nuestra inmunización.

Un buen conocimiento de los mecanismos evolutivos exige la identificación de las causas de las mutaciones y del papel que les corresponda, por una parte a la selección natural, por la otra a los acontecimientos casuales, en el origen y persistencia de modificaciones heredables. Podemos rastrear los cambios heredables a través de los genotipos y de los fenotipos (la morfología o las propiedades físicas); también, a través de la historia vital: virulencia, transmisión, especificidad de los hospedadores y tasa de reproducción. Merced a que cada vez se sepa más del intercambio, o "transferencia horizontal", entre bacterias lejanamente emparentadas de genes que propician la resistencia a fármacos, se ha planteado la búsqueda de nuevas variedades de antibióticos que priven a tales elementos genéticos móviles de la capacidad de replicarse y transferirse.

La mortífera historia de las epidemias gripales y la progresiva elucidación de cómo evolucionan los virus de la gripe sirven para ilustrar la aplicación práctica de algunos de los puntos anteriores. Análisis filogenéticos de extensas muestras de virus gripales, tomadas en diversas especies hospedadoras, nos han demostrado que las aves silvestres constituyen una de las fuentes primarias de esos virus, y que los cerdos domésticos constituyen a menudo, aunque no siempre, intermediarios entre las aves y los humanos. Así pues, las autoridades sanitarias instan ahora a los habitantes de ciertas regiones a que mantengan sus aves y cerdos en instalaciones separadas y cerradas que impidan el contacto con las aves silvestres. Se aconseja asimismo que se vigile una variedad especialmente patogénica, la cepa H5N1 de la gripe de tipo A, amén de otras cepas identificadas filogenéticamente no sólo en las aves de corral, sino también en un pequeño número de especies silvestres, entre ellas algunas especies acuáticas y ribereñas.

Las filogenias demuestran que los genomas de la gripe A constan de ocho segmentos característicos que pueden mezclarse con cepas de diferentes especies hospedadoras. Esta forma de recombinación, combinada con las mutaciones en las secuencias de ADN, genera la variedad casi caleidoscópica que faculta a los virus reconfigurados para eludir la inmunidad previamente adquirida y obliga al incesante desarrollo y fabricación de nuevas vacunas. La conjunción de los muestreos geográficos con la historia filogenética de segmentos específicos y de mutaciones concretas cuya patogenia se conozca contribuye a pronosticar la difusión de la enfermedad y a identificar candidatos útiles para el desarrollo de vacunas.

En 1997, los científicos lograron, a duras penas, mantener a raya un brote catastrófico de H5N1 en Hong Kong, tras convencer a las autoridades de la necesidad de sacrificar todas las aves domésticas, el foco vírico local. Aunque la aparición de futuras pandemias no es cuestión hipotética, pues no hay duda de que se van a producir, los conocimientos existentes sobre fuentes evolutivas, sobre la hibridación



1. LA CIENCIA FORENSE puede estarle agradecida a la biología por los conocimientos sobre la evolución de secuencias de ADN; tales segmentos le han proporcionado un poderoso instrumento de obtención de marcadores genéticos, capaces de señalar o descartar vínculos entre los sospechosos de un delito y las pistas obtenidas en el escenario del crimen. En un caso judicial de 1998, que sentó precedente, el análisis filogenético de muestras de VIH apoyó rotundamente la postura del ministerio fiscal, que acusaba a un médico de haberle inyectado el virus a otra persona.

MARTY KATZ *Time Life Pictures/Getty Images (bolsas de sangre)*; DANIEL SAMBRAUS *(jeringuilla)*; MAXIM MARMUR *AFP/Getty Images (tubo)*

entre genomas y sobre la capacidad de los virus gripales de trasladarse entre los hospedadores nos ayudarán a minimizar riesgos.

Medicina evolutiva

Otra de las formas en las que la evolución influye en nuestra salud corresponde a las que podríamos llamar "propiedades de diseño no inteligente" de nuestros organismos, herencia de nuestro pasado evolutivo. En la mujer se da una mayor incidencia relativa de problemas de parto que en otros primates, debido a que las dimensiones de la pelvis no han aumentado parejamente al aumento de tamaño que evolutivamente ha adquirido el cráneo infantil. No obstante, algunas peculiaridades que no parecen "inteligentemente diseñadas" pueden en realidad poseer utilidad. Entre otros ejemplos tenemos la fiebre, las diarreas y el vómito, que contribuyen a purgar las infecciones microbianas.

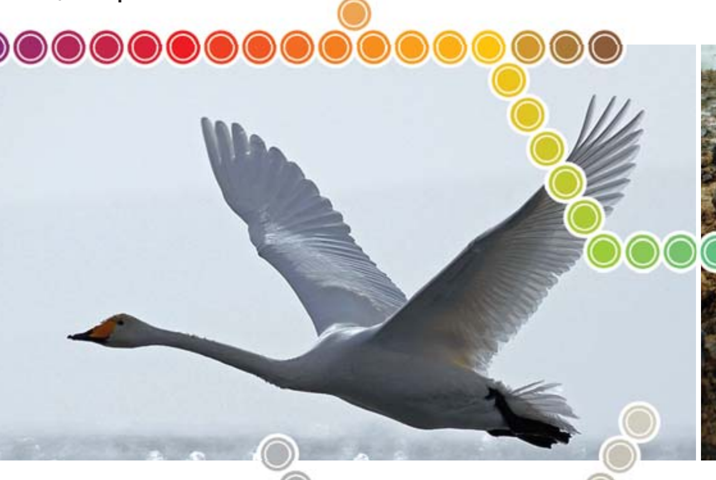
La medicina darwinista, o medicina evolucionista, consiste en aplicar un enfoque evolucionista para conocer los peligros que amenazan a nuestra salud y protegerla de ellos. Un paso fundamental en esa nueva empresa consiste en integrar la ciencia básica de la evolución en los programas de estudios de medicina y sanidad pública.

La asociación de genotipos humanos a determinadas enfermedades ha hecho aflorar la posibilidad de una "medicina personalizada", en la que los médicos prescribirían los medicamentos y las dosis idóneas para cada individuo basándose en rasgos genéticos idiosincrásicos. Tenemos un ejemplo de esta metodología, todavía en pañales, en el caso del fármaco Herceptin (trastuzumab), que logra la reducción de los cánceres de mama que se encuentren en una fase inicial en aproximadamente un 25 por ciento de los casos, si bien, en ocasiones, provoca problemas cardíacos. La información correspondiente al genotipo de la enferma podría identificar la posibilidad de respuesta positiva a Herceptin y valdría para sopesar si la reducida probabilidad de problemas cardíacos constituye un riesgo aceptable [*véase* "Fármacos contra el cáncer de mama", por Francisco J. Esteva y Gabriel Hortobagy; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2008]

Sin embargo, muchas personas se resisten a que se les haga un perfil genético, temerosas de sufrir despidos laborales o rechazos de seguros privados. El Congreso de EE.UU., queriendo disipar estos temores, aprobó en mayo de 2008 la ley GINA (de no discriminación por información genética) que declara ilegal tal discriminación. Otra de las preocupaciones consiste en que la raza pudiera utilizarse como indicador de una predisposición genética a determinadas patologías. Pero ese tipo de consideraciones yerra en su entendimiento de la naturaleza de la diversidad genética humana, por la cual incluso personas emparentadas pueden diferir en su respuesta a un fármaco. Si se desea leer una historia precautoria al respecto, véase "¿Fármacos raciales?", por Jonathan Kahn, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2007.

In vitro e *in silico*

La evolución, actuando durante miles de millones de años, ha demostrado ser un ingeniero sumamente versátil, aunque a veces un tanto desconcertante. En biología molecular se están copiando diseños tomados del tablero de proyectos de la evolución; los propios biólogos están sirviéndose de la evolución dirigida para potenciar funciones útiles de las proteínas. Para ello se provoca deliberadamente la mutación de genes, se producen las proteínas codificadas en ellos, se mide su rendimiento funcional y se seleccionan después conjuntos integrados por las más eficaces para subsiguientes rondas de mutación y ensayo. No es excepcional que la repetición del ciclo, varios millones de veces, dé resultados impresionantes.





2. LAS CEPAS VIRICAS de la gripe humana parten a menudo de las aves silvestres, sirviendo los cerdos domésticos de intermediarios entre aves y humanos. El conocimiento de esta historia evolutiva, revelada mediante análisis de ADN de diversas especies hospedadoras, contribuyó a que los científicos lograsen convencer a las autoridades de Hong Kong de la necesidad de sacrificar todas las aves domésticas para impedir una posible epidemia de la cepa H5N1, también conocida como gripe aviaria, letal para el hombre.

CHINA PHOTOS/GETTY IMAGES (*cisne*); AP PHOTO (*cerdos*); MIKE CLARKE *AFP/Getty Images* (*persona con máscara*)



La comprensión de la historia y de los mecanismos evolutivos permite mejorar de varias formas la evolución dirigida. En primer lugar, el descubrimiento de las relaciones filogenéticas de genes constituye un paso importante para determinar sus funciones y, en consecuencia, para seleccionar genes que sirvan de dianas de la evolución dirigida. El parentesco de genes constituye el mejor indicador disponible para estimar la función de un gen antes de realizar experimentos. Si, por ejemplo, hemos determinado experimentalmente las funciones que le corresponden a un gen en ratones, resulta razonable suponer que el gen de los humanos más estrechamente emparentados con aquél va a realizar funciones similares.

En segundo lugar, el conocimiento de curso evolutivo de genes concretos —el conocimiento de los mecanismos de mutación y de cómo opera sobre ellos la selección natural— indica la elección de las mutaciones que conviene imponer en una evolución dirigida. Una proteína consiste en una secuencia de aminoácidos; su secuencia es lo que, en definitiva, determina su función. En la evolución dirigida se puede optar por alterar aminoácidos individuales ubicados en puntos aleatorios de la secuencia o por alterar solamente los ubicados en ciertas regiones, incluso en posiciones específicas de la secuencia que se sepa que son funcionalmente importantes. Los genes codificadores de proteínas están estructurados en segmentos, que es posible barajar para crear disposiciones que posean nuevas capacidades. Cabe también mezclar los segmentos estructurales de genes emparentados procedentes de una familia de genes (filogenéticamente identificados) o de especies hermanas, con el propósito de construir proteínas quiméricas. La recombinación y barajadura de segmentos de genes ha producido en la naturaleza una rápida evolución de las proteínas. Este proceder, remedado en el laboratorio, ha demostrado su potencia. Los investigadores han acelerado todavía más el cambio evolutivo al barajar genomas completos entre poblaciones de microorganismos seleccionados.

Entre los éxitos de la evolución dirigida se cuentan una vacuna contra el virus del papiloma humano y vacunas más eficaces contra la hepatitis C. Por barajadura de segmentos de 20 interferones humanos (los interferones son familias de proteínas del sistema inmunitario humano) se han obtenido proteínas quiméricas cuya eficacia en frenar la replicación vírica es 250.000 veces mayor. Una proteína supresora de tumores, la p53 humana, mejorada de esta forma, ha inhibido mejor el crecimiento tumoral en experimentos de laboratorio, y se está trabajando para transferir ese éxito a individuos cuyas proteínas p53 sean deficientes.

Otra de las formas en las que científicos e ingenieros emulan la evolución en sus laboratorios es mediante los programas informáticos llamados algoritmos evolutivos o algoritmos genéticos. Se ha hecho gran uso de esta herramienta para buscar soluciones óptimas a problemas complejos, entre ellos la planificación del tráfico aéreo, la predicción meteorológica, el balance de las carteras de valores o la optimización de combinaciones de medicinas, así como para diseñar puentes, circuitos electrónicos o sistemas de control de robots [*véase* “Invención por evolución”, por John R. Koza, Martin A. Keane y Matthew J. Streeter; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2003].

La estructura general de un algoritmo evolutivo consta de cinco pasos:

1. Generación de una población de hipotéticas soluciones.
2. Evaluación de la adecuación, o aptitud, de cada solución hipotética.
3. Si alguna de las soluciones hipotéticas cumple en su totalidad los requisitos exigidos, detención del proceso.
4. De no ser así: selección de grupos de individuos relativamente aptos, que formarán la generación paterna.
5. Someter a los padres a cambios mutacionales y a recombinación “sexual” de sus características, con el fin de engendrar una nueva generación de hipotéticas soluciones. Seguidamente, retorno al paso 2.

La programación genética descubre en ocasiones soluciones muy dispares de los diseños humanos típicos. Fue el caso de una computación evolutiva concebida para dar, a las constelaciones de satélites de comunicaciones, órbitas que minimizasen las pérdidas de señal en los receptores terrestres: identificó configuraciones orbitales inusitadamente asimétricas, con separaciones variables entre las trayectorias de los satélites integrantes. Estas constelaciones obtenidas por evolución presentaron mayores rendimientos que las disposiciones simétricas que habitualmente consideran los proyectistas.

Servicios esenciales

Conforme sigue aumentando la población humana, provocando cambios ambientales acelerados, son cada vez mayores los temores

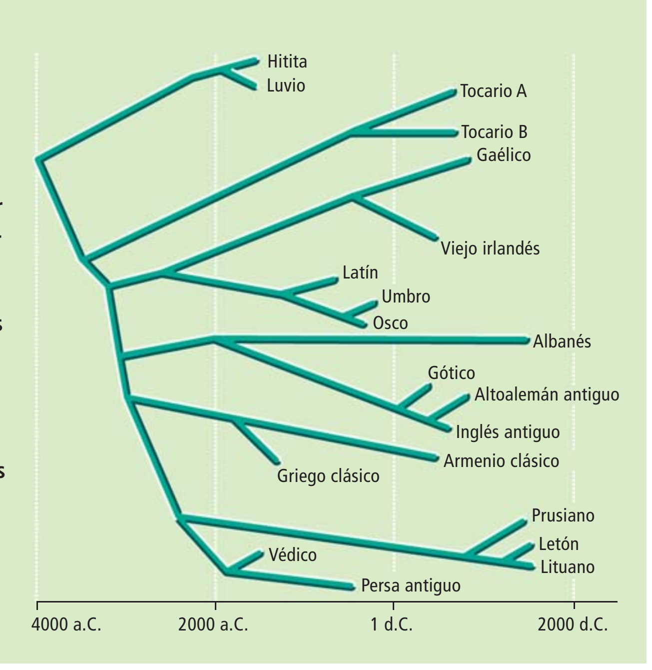
El autor

David P. Mindell es decano de ciencias y titular de la cátedra Harry W. y Diana V. Hind de la Academia de Ciencias de California, sede del Museo Kimball de Historia Natural de San Francisco. Antes de ocupar ese puesto en julio de 2008, enseñaba ecología y biología evolutiva en la Universidad de Michigan en Ann Arbor y estuvo a cargo de la división de aves del Museo de Zoología de la Universidad. Su campo de investigación actual se centra en la sistemática molecular aviaria y en la biología de la conservación de las aves de presa.

El árbol de las lenguas

El propio Charles Darwin señaló ya la relación entre la genealogía humana y la transformación de las lenguas: "Si tuviéramos un conocimiento perfecto del linaje de la humanidad, la ordenación genealógica de las razas del hombre permitiría la mejor clasificación de las distintas lenguas que se hablan hoy en todo el mundo; y si en ella se incluyesen todos los dialectos intermedios y lentamente cambiantes, tal ordenación sería la única posible."

Las lenguas no evolucionan en un sentido biológico estricto. Pero sí varían con el tiempo de forma análoga a la evolución biológica. En tales cambios, la innovación humana y los préstamos mutuos desempeñan una importante función. El estudio de la evolución de las lenguas comenzó hace más de 50 años con la compilación de las palabras cognatas —palabras que comparten orígenes comunes— de pares de lenguas. Más recientemente, lingüistas y científicos evolucionistas han aplicado el método estadístico de la máxima verosimilitud y el análisis bayesiano (que los biólogos utilizan en análisis filogenéticos de la evolución) al estudio de la evolución de las lenguas. Aplican dichas técnicas a conjuntos de datos integrados por palabras cognatas y estructuras lingüísticas: la gramática y los fonemas de los idiomas. Análisis basados en modelos evolutivos centrados en los rasgos de más lenta variación de la estructura del lenguaje sugieren que ciertas relaciones históricas pueden remontarse a hace más de 20.000 años.



LAS LENGUAS INDOEUROPEAS quedan organizadas en árboles evolutivos (*a la derecha*) al aplicar métodos filogenéticos, propios de la biología, a conjuntos de palabras cognatas y otras peculiaridades compartidas. Está por determinar cuál de los muchos árboles posibles representa de forma óptima la historia de las lenguas.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: "RECONSTRUCTING THE EVOLUTIONARY HISTORY OF INDO-EUROPEAN LANGUAGES USING ANSWER SET PROGRAMMING", POR E. ERDEM, V. LIFSCHITZ, L. NAKHLEH Y D. RINGE EN *PRACTICAL ASPECTS OF DECLARATIVE LANGUAGES (PADL): 5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2003*; SPRINGER, 2003

relativos a la conservación de la diversidad biológica y a la sostenibilidad de las poblaciones humanas con el tiempo. Dependemos de ecosistemas saludables, integrados por organismos y sus hábitats, que nos proporcionen agua utilizable, tierra cultivable y aire limpio. Los servicios que estos ecosistemas nos prestan son esenciales para el bienestar del hombre. Sin embargo, lo que sabemos sobre la regulación y sobre las consecuencias de los cambios en los ecosistemas es bien poco. ¿Qué papel desempeñan en los ecosistemas especies y comunidades concretas? ¿Qué grado de sensibilidad presentan esos sistemas naturales ante la pérdida de especies y de hábitats? ¿En qué medida influyen los cambios de los ecosistemas en el clima local, en la polinización y dispersión de semillas por las plantas, en la descomposición de los residuos y en la aparición y difusión de enfermedades? Preguntas que plantean difíciles problemas, resolubles con la ayuda de métodos y principios evolucionistas.

Para la gestión de recursos es esencial efectuar un inventario. Sin embargo, son muchas las formas de vida que todavía no han sido descubiertas y descritas; entre ellas, legiones de virus, bacterias y protistas. El esfuerzo por determinar los vínculos genealógicos entre todos los seres vivos incluye un amplio muestreo genético de la diversidad biológica, tanto la que hay en el seno de cada especie como la existente entre especies. Los ecólogos, provistos de la información procedente de los análisis filogenéticos de estas muestras, pueden evaluar la diferenciación relativa de grupos de organismos y delinear las unidades evolutivas (especies concretas o grupos de especies) cuya conservación se vea en entredicho.

En muchos análisis filogenéticos se han revelado especies hasta entonces sin identificar. El ADN de poblaciones de elefantes africanos confirmó que en Africa había dos especies de elefantes, en lugar de una, como se creía. *Loxodonta africana* se encuentra principalmente en hábitats boscosos, mientras que *L. cyclotis*, nombre acuñado no hace mucho, vive en la sabana. Los análisis de ADN han descubierto también nuevas especies de tortugas asiáticas de caparazón blando, de ballenas y de buitres del Viejo Mundo, por numerar algunas.

El desarrollo de marcadores genéticos característicos de especies de vertebrados hace más viable las leyes de protección de especies, al permitir la identificación de animales en peligro, o de partes de ellos, vendidos ilegalmente o contrabandeados. Esta metodología ha contribuido a la persecución de la caza furtiva de ballenas, del uso de productos derivados del tigre para medicinas o de la recolección de caviar de especies protegidas de esturiones.

Metagenómica

El ADN de un organismo encierra su genoma. Si se recopila el ADN de la comunidad microbiana de especies diversas que moran en un determinado lugar, se tendrá un metagenoma. Los biólogos saben cómo aislar fragmentos de ADN de una tal comunidad, determinar las secuencias de bases de esos fragmentos y recomponerlos en secuencias continuas. Todo ello sin necesidad de la muy laboriosa y difícil tarea de cultivar los microorganismos en el laboratorio, tarea ardua y laboriosa.

El análisis metagenómico de los microorganismos residentes en el tracto intestinal hu-



mano ha revelado un número de genes más de 100 veces mayor que el de los integrantes de nuestro propio genoma (que contiene unos 25.000 genes codificadores de proteínas), así como más de 300 formas microbianas desconocidas y a las que hasta el momento resulta imposible cultivar. Los microorganismos conocidos y sus genes cumplen funciones importantes en el desarrollo de nuestros sistemas inmunitarios, en la producción de ácidos grasos (que proporcionan la energía para un crecimiento sano de las células intestinales) y en la destoxificación de sustancias ingeridas que podrían inducir la proliferación de células cancerosas o la alteración de nuestra capacidad de metabolizar medicinas. Los análisis metagenómicos llevan a pensar que los cambios en la ocurrencia, abundancia e interacción de estos microorganismos, conocidos o no, desempeña un papel en enfermedades humanas, como el mal de Crohn, o en disfunciones, como la obesidad.

Los análisis metagenómicos del aparato reproductor de la mujer han revelado que la vaginosis bacteriana —enfermedad asociada con los partos prematuros—, la enfermedad inflamatoria pélvica y la adquisición de patógenos de transmisión sexual, como el VIH, va acompañada de grandes cambios en las clases de especies que componen las comunidades de bacterias vaginales. Han sido muchos los grupos bacterianos recientemente descubiertos, lo mismo en ecosistemas vaginales sanos que enfermos. Para lograr tratamientos más eficaces de la vaginosis bacteriana se requiere un mejor conocimiento de la forma en que se producen tales modificaciones de los ecosistemas vaginales y de su repercusión en el funcionamiento del ecosistema y la progresión de la enfermedad.

Ocupémonos ahora de los ecosistemas externos y de la “sostenibilidad”. Análisis metagenómicos de muestras de agua tomadas en el océano Pacífico y en el mar de los Sargazos —en el Atlántico—, han indicado que una inmensa cantidad de diversidad biológica marina, en la que se cuentan muchos virus, está todavía por descubrir y estudiar. Es relativamente poco lo que se sabe de las capacidades metabólicas y las funciones ecológicas de esos linajes microbianos tan dispares. Es necesario que las conozcamos —son muchos los proyectos que están en marcha— porque de las comunidades microbianas depende, en gran medida, el sostén de la vida en la Tierra. Ellas son las que realizan la mayor parte de la fotosíntesis y producen y ponen al alcance de otros seres vivos —hombre incluido— los elementos químicos que les son necesarios, como el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el azufre.

El uso de análisis metagenómicos de raíz evolucionista con el propósito de conocer la composición de comunidades en circunstancias varias constituye el primer paso para saber qué hacen los miembros de la comunidad, la forma en que interactúan y cómo se modifican y permanecen a lo largo del tiempo. ¿Poseen las comunidades con gran diversidad microbiana más resistencia a los cambios ambientales que las de diversidad escasa? ¿Existen grupos particulares de especies que revistan interés particular en el mantenimiento de un ecosistema? ¿A qué se debe la formación y la rotación en la composición de las comunidades microbianas? Los conceptos y métodos necesarios para este próximo nivel de conocimiento pertenecen en buena medida al dominio de la ecología evolutiva, que se ocupa del estudio de las interacciones en donde residen.

Todavía no se han visto aplicaciones surgidas de la metagenómica microbiana y de la ecología evolutiva, pero no faltan las posibilidades. Los microorganismos son productores y consumidores de dióxido de carbono, de metano y de otros gases con efecto invernadero; quizá lleguen a desempeñar un papel importante en el empeño por poner coto al calentamiento global. Sistemas basados en la metagenómica podrían supervisar la salud ambiental y vigilar la aparición de patógenos, tanto si dicha presencia procede de la naturaleza como si es obra de terroristas. La metagenómica podría también diagnosticar numerosas enfermedades de los humanos y del ganado, a las que se podría tratar mediante terapias probióticas (es decir, mediante la introducción de microorganismos benéficos). Cabría sacar provecho de microorganismos recién descubiertos para desarrollar nuevos antibióticos, identificar enzimas capaces de extraer glucosa de la celulosa (a la que después se fermentaría para convertirla en etanol, utilizable como combustible) y en la biorremediación de la contaminación del suelo o del agua.

El conocimiento científico emana, sin apenas reserva, de la observación e interrogación de la naturaleza a un cierto nivel. Pero la naturaleza, cuando enseña, no imparte lecciones teóricas ni entrega guías: apela a nuestra curiosidad innata; lo que nos amedrente o nos resulte de una extraña belleza nos moverá a aprender. La evolución constituye el principio unificador para el conocimiento de toda vida; la aplicación de las lecciones que enseña sobre la historia y los mecanismos de cambio contribuyen al bienestar de los seres humanos. Lo que fuera antaño curiosidad es ahora un poderoso instrumento.

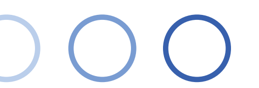
Bibliografía complementaria

THE FUTURE OF LIFE. Edward O. Wilson. Alfred Knopf, 2002.

A CITIZEN’S GUIDE TO ECOLOGY. Lawrence B. Slobodkin. Oxford, 2003.

IS EVOLUTIONARY BIOLOGY STRATEGIC SCIENCE? Thomas R. Meagher en *Evolution*, vol. 61, págs. 239-244; 2007.

EVOLUTION IN HEALTH AND DISEASE. Compilación de Stephen C. Stearns y Jacob C. Koella. Oxford University Press, 2008.



Estratagemas del creacionismo

Los creacionistas estadounidenses pretenden que sus ideas religiosas sean impartidas en las escuelas públicas. Para esquivar los reveses legales, disfrazan de maneras diversas sus verdaderos objetivos

• • • GLENN BRANCH Y EUGENIE C. SCOTT

Es normal que un profesor dé consejos a sus alumnos. Lo que no es tan habitual es que suceda cuando dejaron atrás la escuela. En fecha reciente, Arthur Landy, profesor de biología molecular y celular y de bioquímica en la Universidad Brown, se vio obligado a recordar a un ex alumno suyo del curso preparatorio de medicina que "la evolución resulta necesaria para comprender la biología moderna, incluidas la medicina y la biotecnología".

Por supuesto, Landy no era el primero en expresar tal convicción: treinta y seis años antes, Theodosius Dobzhansky, uno de los fundadores de la moderna teoría de la evolución, afirmaba en *The American Biology Teacher* que "nada tiene sentido en biología salvo a la luz de la evolución". Ya entonces Dobzhansky animaba a los profesores a que enseñaran la evolución haciendo caso omiso de la oposición fundada en opiniones religiosas.

Landy hablaba entonces con Bobby Jindal, hoy gobernador de Louisiana. Sobre la mesa, éste tenía, preparada para la firma, una reciente medida antievolucionista: la Ley sobre Enseñanza de la Ciencia en Louisiana. Puesto que Jindal había sido un buen alumno en genética, Landy esperaba que no olvidara la importancia de la evolución en biología y medicina. También el Instituto Norteamericano de Ciencias Biológicas se oponía a la ley; advertía que Louisiana se convertiría en referente nacional de un estado que antepone la política a la ciencia y a la educación.

La Asociación Norteamericana para el Progreso de la Ciencia señaló a Jindal que corría el riesgo de provocar un ataque contra la integridad científica. Con anterioridad, la Asociación Nacional de Profesores de Biología había instado la revocación de esa ley; alegaba que "Louisiana no debe permitir que su historial científico se arruine fomentando la utilización de materiales adicionales con el único propósito de confundir a los estudiantes sobre la naturaleza de la ciencia".

Pero las protestas cayeron en saco roto. El 26 de junio de 2008, la oficina del gobernador anunciaba que Jindal había firmado la Ley sobre Enseñanza de la Ciencia en Louisiana, ya incorporada a la legislación. ¿Por qué todo este alboroto? En apariencia, la ley es inofensiva: ordena al consejo de educación del estado a "autorizar y ayudar a profesores, autoridades y otros administradores escolares para la creación y promoción de un entorno en las escuelas públicas primarias y secundarias destinado a impulsar el pensamiento crítico, el análisis lógico y los debates abiertos y objetivos sobre las teorías científicas que se estudien". Ello incluye "el apoyo y la guía a los profesores en cuanto a los métodos para facilitar a los alumnos la comprensión, el análisis, la crítica y la revisión objetiva de las teorías científicas que están estudiando". ¿Qué es lo que no

CONCEPTOS BASICOS

- Los creacionistas siguen intrigando contra la enseñanza de la evolución en las escuelas públicas, adaptando sus tácticas a los obstáculos que encuentran.
- En estrategias anteriores han presentado el creacionismo como alternativa creíble a la evolución, disfrazándola con el nombre de "diseño inteligente".
- Otras tácticas se basan en tergiversar la evolución como tema de polémica científica. Los partidarios del creacionismo fingen defender la libertad académica.

ZACHARY ZAVISLAK (*fotografía*); KURSTEN BRACCHI (*estilismo*)

1. **INTRODUCIR LA RELIGION** en los programas de ciencia de las escuelas públicas suele ser un objetivo oculto de las leyes estadounidenses sobre la enseñanza de la evolución.



gusta? El pensamiento crítico, el análisis lógico y el debate abierto y objetivo, ¿no son precisamente los fines que persigue la enseñanza de la ciencia?

Como siempre ha sucedido en la enseñanza de la evolución en Estados Unidos, el mal se esconde en la letra pequeña. La ley se dirige de forma explícita a la evolución, lo que no debe sorprendernos. En sus fundamentos se esconde el creacionismo, el rechazo de una explicación científica del origen de la vida en favor de un relato sobrenatural en el que interviene un creador personal. La sentencia de Dobzhansky se invierte: nada tiene sentido en la Ley de Louisiana salvo a la luz del creacionismo.

Evolución del creacionismo

Los creacionistas llevan largo tiempo batallando contra la enseñanza de la evolución en las escuelas públicas estadounidenses. Sus tácticas han variado en respuesta a los reveses legales. En los años veinte del siglo pasado, intentaron prohibir de raíz que se enseñara la evolución mediante leyes como la Butler de Tennessee, por la cual fue procesado en 1925 el profesor John T. Scopes. Hasta 1968 estas leyes no fueron declaradas anticonstitucionales por la Corte Suprema (caso *Epperson contra Arkansas*).

Al no poder mantener la evolución fuera de las aulas de las escuelas públicas, los creacionistas comenzaron a presentar su doctrina como una alternativa científicamente creíble. La denominaron ciencia de la creación o creacionismo científico. En los primeros años ochenta regía ya, al menos en 27 estados, una legislación que reclamaba un tiempo de enseñanza igual para la ciencia de la creación. Uno de ellos, Louisiana, aprobó en 1981 una ley para el Tratamiento Equilibrado de la Ciencia de la Creación y la Ciencia de la Evolución en la Instrucción Pública. En ella se imponía la enseñanza de la ciencia de la creación a los profesores que enseñaran evolución.

La Ley de Tratamiento Equilibrado en Louisiana se basaba en una declaración programática difundida a través del país por los creacionistas que hacían campaña en la calle. Inspirado en una interpretación literal del Génesis, el programa definía una ciencia de la creación según la cual el mundo había surgido *ex nihilo* (de la nada), hubo una inundación universal (diluvio) y la Tierra es joven; asimismo, se rechaza que los simios y los humanos



2. LA CLAUSULA DE ESTABLECIMIENTO de la primera enmienda a la Constitución de EE.UU. se entiende hoy como exigencia de separación entre las iglesias y el estado. En su virtud, la Corte Suprema ha tachado de inconstitucionales las leyes dirigidas a la enseñanza del creacionismo en las escuelas públicas. Por eso los creacionistas tratan hoy de disfrazar esa finalidad.

ISTOCKPHOTO.COM (*Bill of Rights*); *AP Photo* (*Scopes*); LAWRENCE JACKSON *AP Photo* (*George W. Bush con estudiantes*)

Le toca mover ficha

He aquí una sucesión de eventos que jalonan la batalla que se libra en EE.UU. entre creacionistas y evolucionistas. Se exponen los cambios en las estratagemas creacionistas en respuesta a los avances de la evolución en las clases y a los dictados de tribunales que han prohibido el proselitismo religioso en las escuelas públicas.

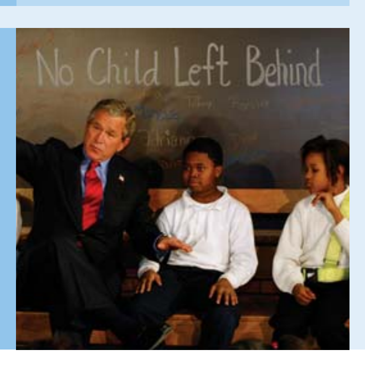
Ultimos años 1910 y primeros 1920:
Al aumentar la asistencia a los centros de enseñanza secundaria, se instruye sobre la evolución a un número mayor de estudiantes.

1925:
La Ley Butler en Tennessee prohíbe la enseñanza sobre la evolución humana. El profesor John T. Scopes (*arriba*) es procesado y condenado con arreglo a la ley, aunque su condena se revoca más tarde por cuestiones técnicas.

1958:
Se funda el Estudio Curricular de las Ciencias Biológicas. Lo financia un gobierno federal interesado por la ciencia en la estela del Sputnik. Sus textos hacen hincapié en la evolución, en gran medida ausente de los libros después del juicio de Scopes; las publicaciones comerciales siguen la tendencia.

1989:
Se publica *Sobre pandas y personas*, primer libro que utiliza de forma sistemática el término "diseño inteligente", idea que se presenta como una alternativa a la evolución.

2001:
La aprobación de la Ley para que Ningún Niño Se Quede Atrás ("No Child Left Behind") sienta la importancia de los currículos escolares, convertidos en un nuevo campo de batalla entre el creacionismo y la teoría de la evolución.



tengamos antepasados comunes. En Arkansas, el programa se estableció antes, en 1981, pero pronto fue recurrido por inconstitucional ante los tribunales.

Con la Ley de Louisiana todavía en gestación, sus partidarios se anticiparon a un obstáculo similar. Expurgaron la definición de ciencia de la creación que daba esa ley hasta dejarla en “las pruebas científicas de la creación y las deducciones obtenidas de dichas pruebas científicas”. Sin embargo, esta estudiada imprecisión no consiguió tornar constitucional la ley; en 1987, la Corte Suprema declaró (caso *Edwards contra Aguillard*) que la Ley de Tratamiento Equilibrado infringía la Cláusula de Establecimiento de la Primera Enmienda a la Constitución, puesto que “respaldaba de manera intolerable la religión al exponer la creencia religiosa de que un ser sobrenatural creó la humanidad”.

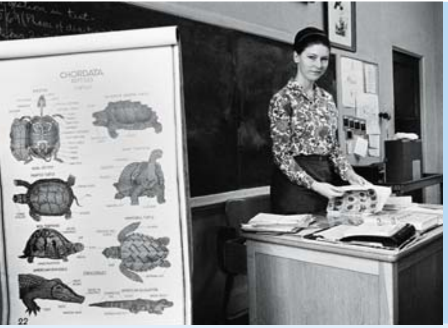
El creacionismo sabe adaptarse con prontitud. Sólo dos años más tarde, se arropó bajo una nueva etiqueta (el “diseño inteligente”) en el libro *Sobre pandas y personas*, publicado por la Fundación para el Pensamiento y la Etica, una fábrica de ideas del ámbito cristiano. Continuando la estrategia de reducción del contenido religioso marcada en la Ley sobre Tratamiento Equilibrado de Louisiana, el diseño inteligente declara no apoyarse en texto sagrado alguno ni apelar a lo sobrenatural. Según sus defensores, el diseñador podría ser Dios, seres extraterrestres o biólogos celulares que naveguen en el tiempo desde un lejano futuro. Sabedores de que la enseñanza del creacionismo en escuelas públicas es inconstitucional, rechazan airadamente que el diseño inteligente se considere una forma de creacionismo. Sin embargo, un examen cuidadoso revela que no es sino una refundición del creacionismo, que guarda silencio sobre reivindicaciones distintivas de la ciencia de la creación (como la juventud de la Tierra y la veracidad histórica del diluvio de Noé), pero que incurre en los mismos errores científicos y se enreda en las mismas tesis religiosas.

El referido examen tuvo lugar ante un tribunal federal en 2005, en el juicio del caso *Kitzmiller contra la escuela del distrito del área de Dover*. Se discutía una norma de un distrito escolar de Pennsylvania, que obligaba a leer en voz alta en el aula que “la evolución es una teoría... no una realidad”, que “la teoría tiene lagunas de las que no hay pruebas evidentes” y que el diseño inteligente, tal como se presenta en *Sobre pandas y personas*, constituye una alternativa científica creíble a la evolución. Once padres de familia se querellaron ante el tribunal federal del distrito, alegando que la norma era inconstitucional. Tras un juicio que duró los 40 días bíblicos, el juez dictaminó que la norma violaba la Cláusula de Establecimiento. Consideró que el diseño inteligente no correspondía a una teoría científica y que no podía desvincularse de sus antecedentes creacionistas y, por tanto, religiosos.

El testimonio que presentó en el referido juicio un testigo experto resultó devastador para las pretensiones científicas del diseño inteligente. El diseño inteligente se formuló con el propósito de iluminar el creacionismo. La filósofa Barbara Forrest, coautora del libro *El caballo troyano del creacionismo: la cuña del diseño inteligente*, reveló que

Los autores

Glenn Branch y **Eugenie C. Scott** son director adjunto y directora ejecutiva del Centro Nacional para la Enseñanza de la Ciencia en Oakland, California, organismo que defiende la enseñanza de la evolución en las escuelas públicas estadounidenses. Branch tiene formación filosófica; se dedica al estudio de las seudociencias. Scott, antropóloga física y ex profesora universitaria, es una autoridad internacional sobre el movimiento antievolucionista.



1968:
La Corte Suprema sentencia en el caso *Epperson contra Arkansas* que las leyes que prohíben la enseñanza de la evolución en las escuelas públicas son inconstitucionales. A la izquierda, la profesora Susan Epperson en 1966.

1981:
Louisiana aprueba la Ley para el Tratamiento Equilibrado de la Ciencia de la Creación y la Ciencia de la Evolución en la Instrucción Pública. Además, en los años ochenta, en más de 25 estados se promulgan leyes que reclaman igualdad de tiempo para la “ciencia de la creación”.



1987:
La Corte Suprema sentencia en el caso *Edwards contra Aguillard* que la Ley para el Tratamiento Equilibrado de Louisiana infringe la Cláusula de Establecimiento de la Primera Enmienda.

2005:
La decisión del caso *Kitzmiller contra el distrito escolar del condado de Dover* establece la inconstitucionalidad de la enseñanza del diseño inteligente en las escuelas públicas. A la derecha, la demandante Tammy Kitzmiller durante una pausa del juicio.



Junio de 2008:
El gobernador Bobby Jindal (*derecha*) firma la Ley sobre Enseñanza de la Educación en Louisiana. Presentada como apoyo al pensamiento crítico en el aula, la ley amenaza con dar paso a la enseñanza del creacionismo y a críticas a la evolución desprovistas de base científica.



AP PHOTO (*Epperson*); CAROLYN KASTER *AP Photo* (*Kitzmiller*); RICHARD CUMMINS *Corbis* (*sello del estado de Louisiana*); BILL HABER *AP Photo* (*Jindal*)

can sustain life? Evolutionists think the former is correct, creationists accept the latter view. Creationists reason as



can sustain life? Evolutionists think the former is correct, cdesign proponentsists accept the latter view. Design proponent

3. LA FRASE ABSURDA "cdesign proponentsists" apareció en el manuscrito de *Of Pandas and People* ("Sobre pandas y personas") cuando se sustituyó "creationists" por "design proponents". Esta y otras pruebas revelaron que los editores habían reemplazado de forma sistemática "creacionismo" por "diseño inteligente", después de que en 1987 la Corte Suprema declarara inconstitucional la enseñanza del creacionismo en las escuelas públicas. El descubrimiento de ese gazapo ayudó a convencer a un tribunal de distrito en 2005 de que prohibiera la enseñanza del diseño inteligente.

CORTESIA DE NICK MATZKE (*texto de Pandas and People*)

las referencias al "creacionismo" en las ilustraciones de *Sobre pandas y personas* se habían sustituido por referencias al "diseño", poco después de pronunciarse en 1987 la sentencia del caso Edwards, que derogaba la Ley sobre Tratamiento Equilibrado de Louisiana (descubrió una errata que revelaba la sustitución incompleta de "creationists" por "design proponents", dando lugar a "cdesign proponentsists").

Con todo, lo más importante fue establecer que el diseño inteligente constituía un fracaso científico: el bioquímico Michael Behe testificó en el juicio que no se había publicado en la literatura de investigación científica ningún artículo que describiera en detalle el modo en que se produjo el diseño inteligente de cualquier sistema biológico, pese a ser experto invocado por defensa de la norma del distrito escolar.

Estrategia de repliegue

Incapaces de demostrar la credibilidad científica de sus opiniones, los creacionistas se van retirando de forma gradual a su estrategia clásica de repliegue para socavar la enseñanza de la evolución: exponer las polémicas científicas que atañen a la evolución, pero callarse todo lo relativo a su propuesta alternativa. Esta postura añade sólo un ligero matiz retórico. Desde los tiempos de Scopes, los creacionistas han atacado la evolución con tres argumentos. Nos referimos a los tres pilares del creacionismo: la evolución no se apoya en hechos científicos o entra en conflicto con ellos; la enseñanza de la evolución amenaza a la religión, la moralidad y la sociedad; la honradez exige enseñar a la vez el creacionismo y la evolución. La estrategia de repliegue se adhiere al creacionismo partiendo de una pretendida crisis —no demostrada por la ciencia— de la teoría de la evolución.

A los creacionistas les gusta afirmar que la evolución corresponde a una teoría en crisis porque suponen que sólo hay dos alternativas: el creacionismo (ya sea la ciencia de la creación o el diseño inteligente) y la evolución. Toda prueba contra la evolución se convierte, por tanto, en prueba a favor del creacionismo; la negación de la evolución constituye la demostración del creacionismo. El juez del caso *McLean contra Arkansas* de 1981, en el que se declaró inconstitucional la Ley de Tratamiento Equilibrado de Arkansas, describía esta postura como un "dualismo artificioso". Sin embargo, mediante la crítica de la evolución y la omisión del creacionismo, los defensores de la estrategia de repliegue esperan animar a los estudiantes a que profesen o mantengan cierta adhesión al creacionismo sin pasar por los embrollos de la Cláusula de Establecimiento. El rostro reciente del creacionismo guarda estrecha semejanza con su rostro anterior, aunque con el ligero disfraz de un bigote postizo.

El Instituto para la Investigación de la Creación, promotor del creacionismo, decidió centrar su discurso en las supuestas pruebas contra la evolución. A raíz del fallo del caso Edwards, recomendó que "debe animarse de forma enérgica a los consejos escolares y a los profesores a que en sus clases, al menos, den relieve a las pruebas y argumentos científicos *en contra de la evolución*... aun cuando no deseen reconocerlos como pruebas y argumentos *a favor de la creación*".

El Instituto del Descubrimiento, sede institucional del diseño inteligente, sospechó que las cosas iban a ponerse difíciles aun antes de la resolución del caso Kitzmiller, que sentaba la inconstitucionalidad de la enseñanza del diseño inteligente en las escuelas públicas. Aunque un memorandum interno muy debatido ("El Documento Cuña") hubiera contado entre sus objetivos la introducción en el plan de estudios científicos de 10 estados del diseño inteligente, el referido instituto se retiró a partir de entonces a una estrategia basada en la erosión de la enseñanza de la evolución. Para reforzar su estrategia de repliegue se valió de una oleada de etiquetas y eslóganes: "enseñar las controversias", "análisis crítico" y "libertad académica", entre otros.

"Libertad académica" fue la consigna elegida en la primera mitad de 2008. De hecho, la Ley de Enseñanza de la Ciencia de Louisiana había nacido como Ley de Libertad Académica de Louisiana; otras disposiciones similares se promulgaron en Alabama, Florida, Michigan, Missouri y Carolina del Sur, aunque ninguna entró en vigor. La libertad académica fue uno de los temas centrales en la primera película creacionista que llegó a las pantallas (*Expelled: No Intelligence Allowed*, "Expulsado: no se admite la inteligencia"). La película describía la conspiración de la comunidad científica contra los defensores del creacionismo; aunque reflejaba un compromiso ostensible con la libertad académica, universitaria sobre todo, sirvió como instrumento de presión para legislar la libertad de enseñanza en las escuelas

públicas de Missouri y Florida. (El film resultó un fracaso de crítica y taquilla.)

El eslogan creacionista invoca la libertad académica por razones obvias: todo el mundo aprueba la libertad. Muchos sienten que la libertad académica es deseable, aunque no siempre comprendan bien su significado. La principal organización defensora de este concepto, de importancia primordial para la enseñanza, es la Asociación Norteamericana de Profesores Universitarios, que en fecha reciente ha reafirmado su oposición a las leyes antievolucionistas como la de Louisiana en los siguientes términos: "Tales esfuerzos van en contra del aplastante consenso científico sobre la evolución y no se compaginan con una comprensión correcta del significado de la libertad académica".

Aunque no existiera en las escuelas públicas derecho a la libertad académica, constituiría una sana norma educativa conceder cierto grado de flexibilidad a los profesores para que enseñaran sus asignaturas como les pareciera. Pero siempre hay un límite. Dejar a los educadores que infundan dudas sin validez científica sobre la evolución sobrepasa lo tolerable. Y resulta evidente que la Ley sobre Enseñanza de la Ciencia en Louisiana fue concebida u orientada para ese fin.

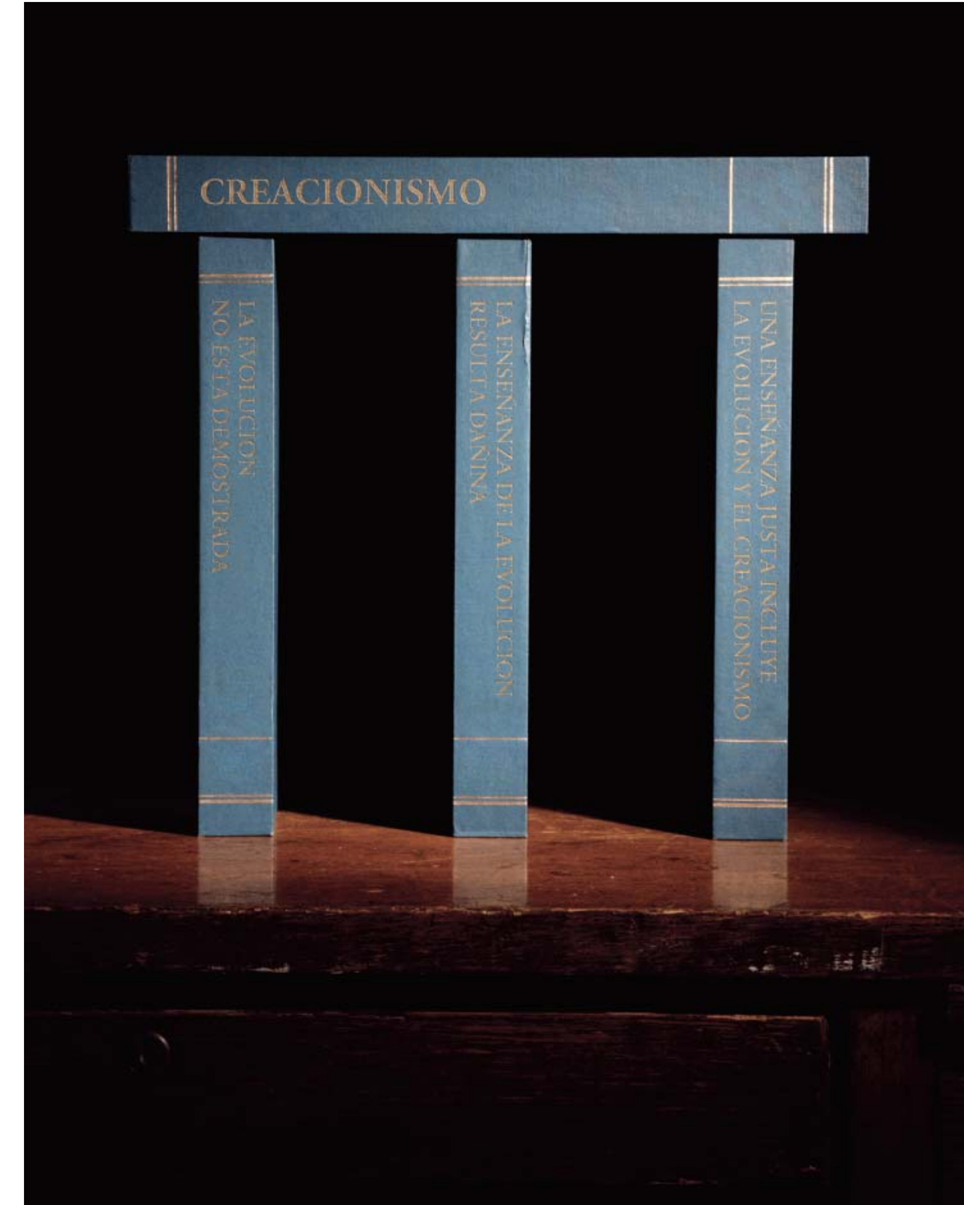
El gusano en la manzana

Al examinar dicha ley se aprecia con claridad su finalidad real, opuesta a su ostensible apoyo a la libertad académica. En primer lugar, ¿qué busca? ¿No se ha exhortado ya a los profesores de escuelas públicas a que estimulen el pensamiento crítico, el análisis lógico y la discusión objetiva de las teorías científicas que están exponiendo? Sí, por supuesto: las normas docentes establecidas por el gobierno de Louisiana fomentan ese modo de actuar, como adujeron los oponentes a la ley durante una sesión legislativa.

Varios indicios revelan el verdadero propósito de la ley. Por un lado, el texto hace mención explícita de sólo unos cuantos temas científicos: "evolución biológica, origen químico de la vida, calentamiento global y clonación humana". Por otro, la ley se presentó a instancias del Foro de la Familia en Louisiana, cuyo fin es "exponer de forma persuasiva, en los centros de influencia sobre cuestiones que afecten a la familia y a través de la investigación, la comunicación y los contactos personales, los principios bíblicos". Por último, el director ejecutivo del grupo quedó sin palabras cuando dichos temas se suprimieron transitoriamente del texto legal.

En segundo lugar, ¿qué necesidad había de que la legislación de Louisiana animara a los profesores a estimular las críticas de la evolución? Ninguna. Patsye Peebles, veterano profesor de ciencias en Baton Rouge, comentaba: "Enseñé biología durante 22 años y nunca necesité leyes que me dijeran cómo debía explicar nada. Esta ley no resuelve ninguno de los problemas que encontramos en el aula y dificulta nuestra concentración en la verdadera ciencia". La Asociación Nacional estadounidense de Profesores de Biología, que reúne a más de 9000 docentes en el país, se opuso con firmeza a la ley. En la vecina Florida, los patrocinadores de leyes similares alegaron que había profesores a quienes se les prohibió "enseñar las 'lagunas' de la evolución" o que fueron sancionados por ello. Pero nunca aparecieron tales profesores; ni el departamento de educación del estado ni los periódicos locales fueron capaces de confirmar los pretendidos incidentes de persecución.

En tercer término, ¿a qué "lagunas" en la evolución se refieren? Los más avisados defensores de leyes como las de Florida y Louisiana son conscientes de la necesidad de abandonar



4. LOS TRES PILARES del creacionismo sustentan multitud de campañas antievolucionistas. Pese a reivindicar la categoría científica del creacionismo, sus partidarios no consiguieron aprobación judicial para llevar la religión a las escuelas públicas. Se vieron obligados a cambiar de estrategia. Ahora se concentran en atacar a la teoría de la evolución: argumentan que tiene fallos, que resulta peligrosa para la religión, la moral y la sociedad, y que se enseña de forma dogmática.

ZACHARY ZAVISLAK (*fotografía*); KURSTEN BRACCHI (*estilismo*)

Leyes antievolucionistas en 2008

Además de Louisiana, varios estados consideraron leyes antievolucionistas el año pasado. Claramente, los esfuerzos para promover esa clase de legislación no ceden en su empeño.

ESTADO REGULADOR	OBJETIVO	SITUACION
Alabama (HB 923)	Apoyar la libertad académica	Abandonada en mayo de 2008
Florida (HB 1483)	Fomentar el análisis crítico	Abandonada en mayo de 2008
Florida (SB 2692)	Apoyar la libertad académica	Abandonada en mayo de 2008
Michigan (SB 1361)	Apoyar la libertad académica	En comisión, cuando se envió este número a la imprenta
Michigan (HB 6027)	Apoyar la libertad académica	En comisión, cuando se envió este número a la imprenta
Missouri (HB 2554)	Promover la enseñanza de puntos fuertes y débiles de la evolución	Abandonada en mayo de 2008
Carolina del Sur (SB 1386)	Promover la enseñanza de puntos fuertes y débiles de la evolución	Abandonada en junio de 2008

cualquier intención de promover el creacionismo. Pero, al no haber forma de cuestionar científicamente la evolución —sino sólo el desprestigiado artificio creacionista—, los padrinos de tales leyes son incapaces de concretar las materias que deberían impartirse.

En Florida, un representante del Instituto del Descubrimiento vaciló cuando le preguntaron si el diseño inteligente constituía "información científica" en el sentido de la ley. "En mi opinión, creo que sí", respondió, para añadir después: "La intención de la ley no es zanjar esta cuestión... sino proteger la 'enseñanza de informaciones científicas'". Durante el debate en el Senado, el patrocinador de la ley se mostró bastante remiso a encarar la cuestión de si debería autorizarse la enseñanza del creacionismo o más bien limitarse a leer su enunciado.

Por todo ello, y pese a la ambigüedad del lenguaje, la intención ulterior y el efecto probable de esas leyes son evidentes: torpedear en las escuelas públicas la enseñanza de la evolución, resultado que sería una bendición para los creacionistas. Por desgracia, entre sus filas hay profesores. Una encuesta nacional, dirigida por la Universidad de Pennsylvania, revela que uno de cada ocho profesores de biología en institutos de EE.UU. presenta el creacionismo como una "válida alternativa científica a las explicaciones de Darwin sobre el origen de las especies"; una proporción semejante del profesorado insiste en que numerosos científicos "de relieve" consideran el creacionismo una alternativa válida a la evolución.

No todos los que enseñan creacionismo son tan extremistas como John Freshwater. Este profesor de escuela secundaria en Mount Vernon, Ohio, tuvo problemas legales por defender la religión en el aula (no sólo enseñaba creacionismo sino que, al parecer, utilizaba un aparato eléctrico de alta tensión para marcar con una cruz a sus alumnos). Pero hasta los menos celosos probablemente verían en leyes como las de Louisiana un permiso para sesgar la educación. Resulta verosímil que tales leyes se utilicen a escala nacional para intimidar a los profesores no creacionistas: un 30 por ciento ya dan cuenta de presiones para enseñar el creacionismo o depreciar la evolución.

Leyes de ese tipo alentarán más todavía en los distritos escolares donde los creacionistas tengan gran influencia en la adopción de políticas antievolucionistas. Un miembro del Consejo Escolar del condado de Livingston, defensor del decreto de Louisiana, afirmó que debían presentarse ambas teorías, creacionismo y evolución, y que la ley era necesaria porque los profesores no se atrevían a hablar de la creación. ¿Qué posibilidad hay entonces de poner en práctica lo que establece esa ley, es decir, "no favorecer doctrina religiosa alguna"? Según John Derbyshire, columnista conservador, la Ley animará a los consejos escolares locales de Louisiana a comportarse de un modo inconstitucional. Ese es su verdadero propósito.

Futuro de una tergiversación

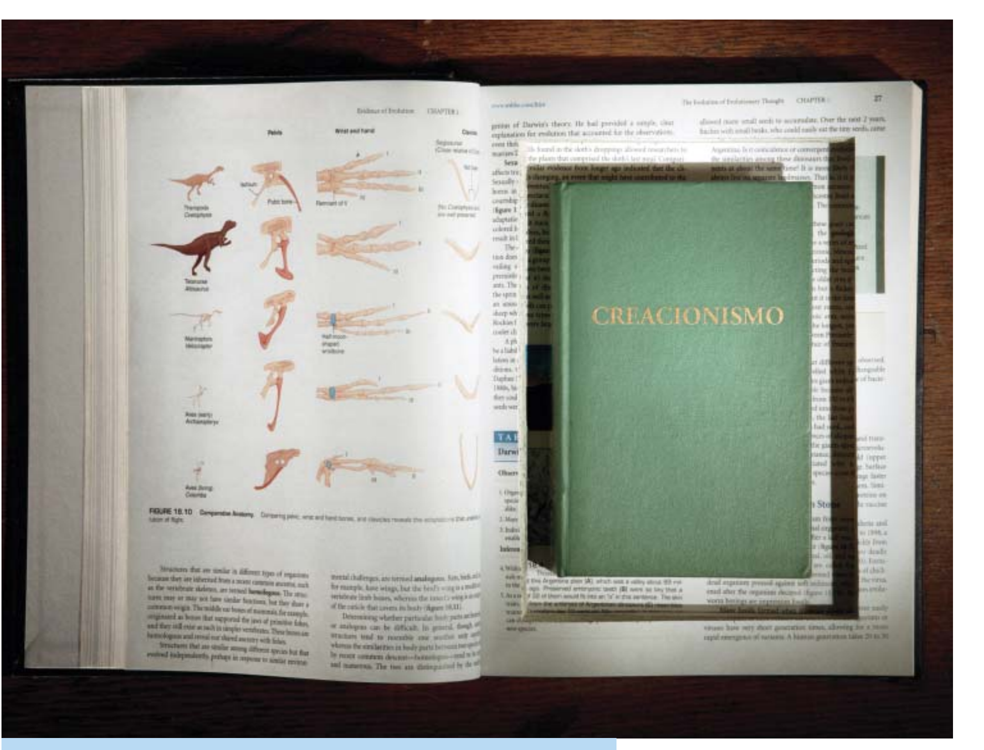
Un caso celebrado en Georgia (*Selman contra el distrito escolar del condado de Cobb*) ilustra cuáles son las perspectivas legales de la actual estrategia creacionista. En 2002, el consejo escolar de ese condado se plegó a las demandas de los creacionistas locales y decidió exigir etiquetas de advertencia en los textos de biología. Utilizando una frase de los creacionistas, anterior al juicio de Scopes en 1925, las etiquetas describían la evolución como "una teoría, no una realidad"; sobre el creacionismo, en cambio, guardaban silencio.

Cinco padres de familia se querellaron ante el tribunal federal del distrito, aduciendo que la exigencia de las etiquetas era inconstitucional. El juez les dio la razón. Presentaron abundantes datos que relacionaban las etiquetas de aviso con la actividad creacionista en el condado de Cobb y que vinculaban la estrategia de repliegue con el creacionismo. Sin embargo, se apeló la sentencia por invalidez de las pruebas presentadas. Pero el tribunal de apelaciones lo devolvió al tribunal del distrito, que, por fin, falló en términos favorables a los padres. Queda por ver si la estrategia de repliegue sobrevivirá al examen

5. EN LA SEXTA EDICION de *El origen de las especies*, Charles Darwin se lamenta del poder de la "tergiversación sistemática". El halló consuelo en las anteriores victorias de la ciencia sobre la falsedad. Sin embargo, la ciencia no basta para combatir campañas dirigidas a la manipulación de los estudiantes; hay que recurrir al activismo.

Great is the power of steady misrepresentation; but the history of science shows that fortunately this power does not long endure.

Darwin Online: By permission of the Trustees of the Natural History Museum (London).



¿Qué podemos hacer?

Si en su entorno se suscitan polémicas sobre la enseñanza de la evolución, puede reaccionar de las siguientes maneras:

✓ Para resolver la controversia recomendamos la formación de coaliciones. Reúnase con educadores, científicos, miembros del clero y otros ciudadanos de mentalidad semejante para convencer a las autoridades políticas de que no cedan a las propuestas creacionistas.

✓ Recuerde que no se trata sólo de mantener el creacionismo fuera de las aulas de ciencias, sino también de asegurar que la evolución se enseña de manera correcta (sin adjetivaciones del tipo "mera teoría" o inexactas "pruebas contra la evolución").

✓ Dispóngase a rechazar afirmaciones como que la evolución es una teoría en crisis, que constituye una amenaza para la religión, la moralidad y la sociedad, y que lo equitativo es presentar "ambas caras" de la cuestión.

✓ Consiga que los defensores de la evolución escriban cartas a editores y educadores, asistan e intervengan en reuniones del consejo escolar o la asamblea legislativa, y trabaje para cambiar el sentido del voto en las elecciones.

Adaptado de "Defensa de la enseñanza de la evolución: estrategias y tácticas para los activistas" de Glenn Branch, en *Not in Our Classrooms: Why Intelligent Design is Wrong for Our Schools*. Preparado por Eugenie C. Scott y Glenn Branch. Beacon, 2006.

Bibliografía complementaria

ANALYZING CRITICAL ANALYSIS: THE FALLBACK ANTIEVOLUTIONIST STRATEGY. Nicholas J. Matzke y Paul R. Gross en *Not in Our Classrooms: Why Intelligent Design is Wrong for Our Schools*. Preparado por Eugenie C. Scott y Glenn Branch. Beacon, 2006.

EVOLUTION: THE TRIUMPH OF AN IDEA. Carl Zimmer. Harper Perennial, 2006.

CREATIONISM'S TROJAN HORSE: THE WEDGE OF INTELLIGENT DESIGN. Edición revisada. Barbara Forrest y Paul R. Gross. Oxford University Press, 2007.

THE DEVIL IN DOVER: AN INSIDER'S STORY OF DOGMA V. DARWIN IN SMALL-TOWN AMERICA. Lauri Lebo. New Press, 2008.

EVOLUTION VS. CREATIONISM: AN INTRODUCTION. Segunda edición. Eugenie C. Scott. Greenwood, 2009.

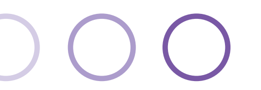
de constitucionalidad en cualquier otro lugar, pero probablemente será combatida, en Louisiana o donde sea.

Mientras tanto, resulta innegable el pernicioso efecto de la Ley sobre Enseñanza de la Ciencia en Louisiana: da un tácito estímulo a profesores y distritos escolares locales para ofrecer una educación deficiente sobre la evolución, bien mediante la enseñanza del creacionismo como alternativa científicamente creíble, bien arrojando sobre la evolución la sombra de supuestas controversias. A todos los efectos y propósitos, inmensas áreas de la ciencia evolucionista están científicamente establecidas; los libros de texto y los currículos de las escuelas públicas presentan con rigor este material básico, exento de complejidad y no sujeto a polémicas. Contar a los estudiantes que la evolución es una teoría en crisis es mentirles.

Además, se trata de una mentira peligrosa, porque Dobzhansky tenía razón al afirmar que nada tiene sentido en biología excepto a la luz de la evolución: de no ser por la evolución, no podríamos explicar por qué la biosfera es así y no de otra manera. Los estudiantes a quienes no se les dé oportunidad de adquirir una comprensión adecuada de la evolución no alcanzarán un nivel básico de cultura científica, cultura que resultará indispensable para trabajadores, consumidores y políticos en un futuro dominado por cuestiones de orden médico, biotecnológico y ambiental.

Al cumplirse 150 años de *El origen de las especies*, parece justo terminar con una referencia a la obra fundamental de Charles Darwin. En su primera edición, en 1859, Darwin se cuidó de reconocer los límites de su proyecto: "Estoy convencido de que la selección natural ha sido el principal, aunque no exclusivo, medio de modificación". No obstante, fue malinterpretado cuando se le acusó de pretender que la selección natural era enteramente responsable de la evolución. Ello le hizo expresar su desencanto en un comentario a la sexta edición: "Grande es el poder de una tergiversación sistemática, pero la historia de la ciencia demuestra que ese poder no perdura".

La entrada en vigor de la Ley sobre Enseñanza de la Ciencia en Louisiana y la perspectiva de futuras leyes similares no hacen sino confirmar el aserto de Darwin sobre el poder de la tergiversación. Pero las leyes antievolucionistas terminan aprobándose por razones más políticas que científicas; por tanto, no puede confiarse en el progreso de la ciencia para garantizar el fracaso de éstas. Serán los propios ciudadanos preocupados por la integridad de la enseñanza de las ciencias quienes deberán movilizarse para conseguir la desaparición de esas leyes.



EL *HOMO SAPIENS* DEL FUTURO

La evolución humana continúa. Nuestro organismo y cerebro no son iguales a los de nuestros antepasados, ni a los que tendrán nuestros descendientes

PETER WARD

Sobre la apariencia futura de los humanos, suelen avanzarse dos hipótesis. Una recurre a la vieja fantasía científica de un cerebro enorme con una frente muy despejada y un intelecto superior. La otra considera que nuestra evolución física ha cesado, porque el desarrollo técnico ha puesto fin a la lógica brutal de la selección natural; la evolución sería hoy puramente cultural.

La hipótesis del "supercerebro" carece de base científica. El registro fósil muestra que el aumento de nuestro cráneo y, por tanto, del volumen cerebral se detuvo hace muchísimo tiempo. De ahí se infirió que había cesado la evolución física del ser humano. Sin embargo, el análisis de genomas antiguos y actuales demuestra que la historia no es tan sencilla. *Homo sapiens* no sólo ha pasado por grandes reorganizaciones genéticas desde la aparición de la especie, sino que el ritmo de su evolución puede incluso haberse acelerado. Lo mismo que otros organismos, los cambios más espectaculares en la forma de nuestro cuerpo acaecieron en los comienzos de la especie; sin embargo, seguimos experimentando cambios genéticos que afectan a nuestra fisiología y quizá también a la conducta. Hasta tiempos muy recientes, en las diversas regiones del planeta se acentuaban las diferencias entre razas humanas, en vez de atenuarse. Las condiciones de la vida moderna podrían estar induciendo modificaciones genéticas que repercutirían en rasgos del comportamiento.

Si no es un cerebro gigante, ¿qué nos depara entonces el futuro? ¿Nos haremos más grandes o más chicos, más listos o más tontos? ¿Cómo nos van a afectar la aparición de nuevas enfermedades o el aumento de la temperatura global? ¿Surgirá algún día una nueva especie humana? ¿O tal vez la futura evolución de la humanidad no descanse en los genes sino en nuestro dominio de la técnica, conforme prolonguemos con silicio y acero nuestro cerebro y cuerpo? Quizá nuestra función evolutiva se reduzca a la construcción de una inteligencia cibernética que dominaría el mundo.

CONCEPTOS BASICOS

- Suele creerse que nuestra especie apenas ha evolucionado desde la prehistoria. Sin embargo, la genética de poblaciones sugiere que el ritmo de la evolución humana se aceleró con la aparición de la agricultura y la urbanización.
- Si nos hallamos todavía en evolución, ¿qué aspecto tendrá nuestra especie dentro de un milenio si logra sobrevivir a las transformaciones ambientales y sociales que nos aguardan? Las hipótesis abarcan desde la esperanza hasta la frustración.

Pasado remoto y pasado reciente

El estudio de la evolución humana solía ser dominio de los paleontólogos, que analizan restos fósiles de eras arcaicas. La familia humana (Hominidae) data por lo menos de hace siete millones de años, tiempo en que vivía un protohumano de breve talla: *Sahelanthropus tchadensis*. Desde entonces, en nuestra familia han nacido varias especies nuevas, algunas todavía cuestionadas: nueve conocidas más otras seguramente ocultas en el escaso registro fósil de los homínidos. Dado que los esqueletos más antiguos que se han hallado raras veces yacían en lechos sedimentarios, la estimación anterior cambia año tras año conforme se publican nuevos descubrimientos y se reinterpretan los anteriores [*véase* "Homínidos contemporáneos", por Ian Tattersall; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2000, y "El más antiguo de los homínidos", por Kate Wong; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2003].

Aparecía por evolución una especie nueva cuando un pequeño grupo de homínidos quedaba por alguna causa separado del grueso de

NESSIM HIGSON (*fotoilustración*); KEVIN SUMMERS *Getty Images* (*flor*); PAUL TAYLOR *Getty Images* (*mano*); RON LEVINE *Getty Images* (*niña*); PHOTODISC *Getty Images* (*cerebro*); iSTOCKPHOTO.COM (*cráneo y huevo*)



MAS ALLA DE *HOMO SAPIENS*

En tiempos pasados, nuestro linaje produjo especies nuevas. ¿Qué sucederá en el futuro? La especiación requiere algún mecanismo de aislamiento. El más común es el geográfico: una población pequeña queda separada del acervo génico principal. Por el tamaño y la capacidad de interconexión de la población mundial, esta posibilidad es remota en las condiciones actuales. Con todo, la especiación podría ocurrir en ciertas circunstancias:

Establecimiento de colonias humanas en mundos distantes.

Pérdida o abandono voluntario de las técnicas que permiten un intercambio global de nuestros genes.

Fraccionamiento en grupos aislados tras una catástrofe como el choque de un gran asteroide con la Tierra.

Intervenciones de ingeniería genética.

El autor

Peter Ward viene dedicándose desde hace más de treinta años a la paleontología, la biología y la astrobiología. De 2001 a 2006 dirigió el centro del Instituto de Astrobiología de la NASA con sede en la Universidad de Washington. Es experto en extinciones en masa e impactos de origen extraterrestre.

la población durante muchas generaciones, en condiciones ambientales inéditas que favorecían la selección de determinadas adaptaciones. Aislados de su linaje, el grupo seguía su propia ruta genética, hasta que sus miembros dejaban de poder cruzarse y tener descendencia con los de la población originaria.

El registro fósil revela que los miembros más antiguos de nuestra especie habitaron hace 195.000 años en lo que hoy es Etiopía; desde allí se extendieron por todo el globo. Unos 10.000 años atrás, los humanos modernos habían colonizado todos los continentes, salvo la Antártida. La adaptación a condiciones locales tan dispares, entre otras fuerzas evolutivas, dio lugar a lo que hoy llamamos —con cierta imprecisión— razas. Los grupos que vivían en diferentes lugares mantuvieron entre sí un grado de relación suficiente para que su evolución no desembocara en especies distintas. Con el planeta poblado, diríase que se ha acabado el tiempo para la evolución.

No hay tal. Un estudio publicado en 2008 por Henry C. Harpending, de la Universidad de Utah, John Hawks, de la Universidad de Wisconsin-Madison, y otros, analizaba los datos del mapa internacional de haplotipos (HapMap) del genoma humano [*véase* "Huellas de un pasado lejano", por Gary Stix; Investigación y Ciencia, septiembre de 2008]. Se concentraron en los marcadores genéticos de 270 individuos procedentes de cuatro grupos: chinos han, japoneses, yorubas y europeos nórdicos. Hallaron que al menos un siete por ciento de los genes humanos habían evolucionado en época muy cercana, hace sólo 5000 años. En buena medida, los cambios consistían en adaptaciones a determinados entornos, naturales y humanizados. Por botón de muestra, pocos individuos adultos de China y Africa pueden digerir la leche cruda; en cambio, casi todos en Suecia y Dinamarca lo hacen, seguramente, por haberse adaptado a la ganadería lechera.

Otro estudio del grupo que dirige Pardis C. Sabeti, de la Universidad de Harvard, escudriñó enormes bloques de datos de variaciones genéticas en busca de indicios de selección natural a través del genoma humano. Más de 300 regiones del genoma mostraron cambios recientes, que mejoraban la capacidad de supervivencia y reproducción del individuo. Alteraciones que conferían resistencia a la fiebre de Lassa (uno de los grandes azotes de Africa), resistencia parcial a endemias como la malaria en algunas poblaciones africanas, cambios de pigmentación de la piel y desarrollo de folículos capilares entre los asiáticos, y evolución hacia una piel más fina y ojos azules en el norte de Europa.

El equipo de Harpending y Hawks estimó que en los 10.000 últimos años la evolución humana había sido hasta 100 veces más rápida que en cualquier otra época desde que los primeros homínidos se escindieron de los precursores de los actuales chimpancés. Esa aceleración de la evolución se atribuyó a la diversidad de entornos habitados por los humanos y a las nuevas condiciones de vida asociadas a la agricultura y la urbanización. No nos referimos al cultivo y la ganadería, ni a la transformación del paisaje debida a la conversión de tierras vírgenes en campos explotados, sino a una combinación, a menudo letal, de sanidad deficiente, nuevos hábitos alimentarios y aparición de enfermedades (contagiadas de otros congéneres o de animales domésticos). Pese a las reservas formuladas sobre tales estimaciones, resulta innegable que los humanos somos unos "maestros" de la evolución.

Selección extranatural

A lo largo del siglo pasado volvió a cambiar el marco vital de nuestra especie. El aislamiento geográfico de los grupos cede ante la facilidad del transporte y van cayendo las barreras sociales que separaban las etnias. Jamás el genoma humano presentó una mezcla tan variada de poblaciones locales que antes habían permanecido aisladas. La movilidad actual podría conducir a la homogeneización de la especie. Al propio tiempo, la selección natural de H*omo sapiens* se ve contrariada por nuestro potencial técnico y terapéutico. En gran parte del mundo, la mortalidad infantil ha experimentado un descenso notable. Hoy viven y engendran hijos individuos con afecciones genéticas que antes resultaban fatales. Los depredadores naturales ya no determinan la supervivencia.

Steve Jones, del Colegio Universitario de Londres, sostiene que la evolución humana ha terminado. En el debate celebrado en 2002 en la Sociedad Regia de Edimburgo bajo el título "¿Ha terminado la evolución?", Jones afirmaba: "Las cosas han cesado de mejorar, o empeorar, para nuestra especie. Si queréis saber cómo es la Utopía, mirad a vuestro alrededor". Jones sugería que, al menos en el mundo desarrollado, casi todas las personas llegan a la edad reproductiva y las posibilidades de tener hijos son iguales para pobres y ricos. La resistencia a enfermedades congénitas (al VIH, por ejemplo) otorgaría todavía una ventaja en cuanto a la supervivencia, pero el factor decisivo sobre la vida o la muerte corresponde hoy a la cultura, más que la herencia genética. En resumen, la evolución puede hoy considerarse "memética" (por la transmisión cultural de la información) más que genética [*véase* "El poder de los me-

PEPI KHARA

mes", por Susan Blackmore; Investigación y Ciencia, diciembre de 2000].

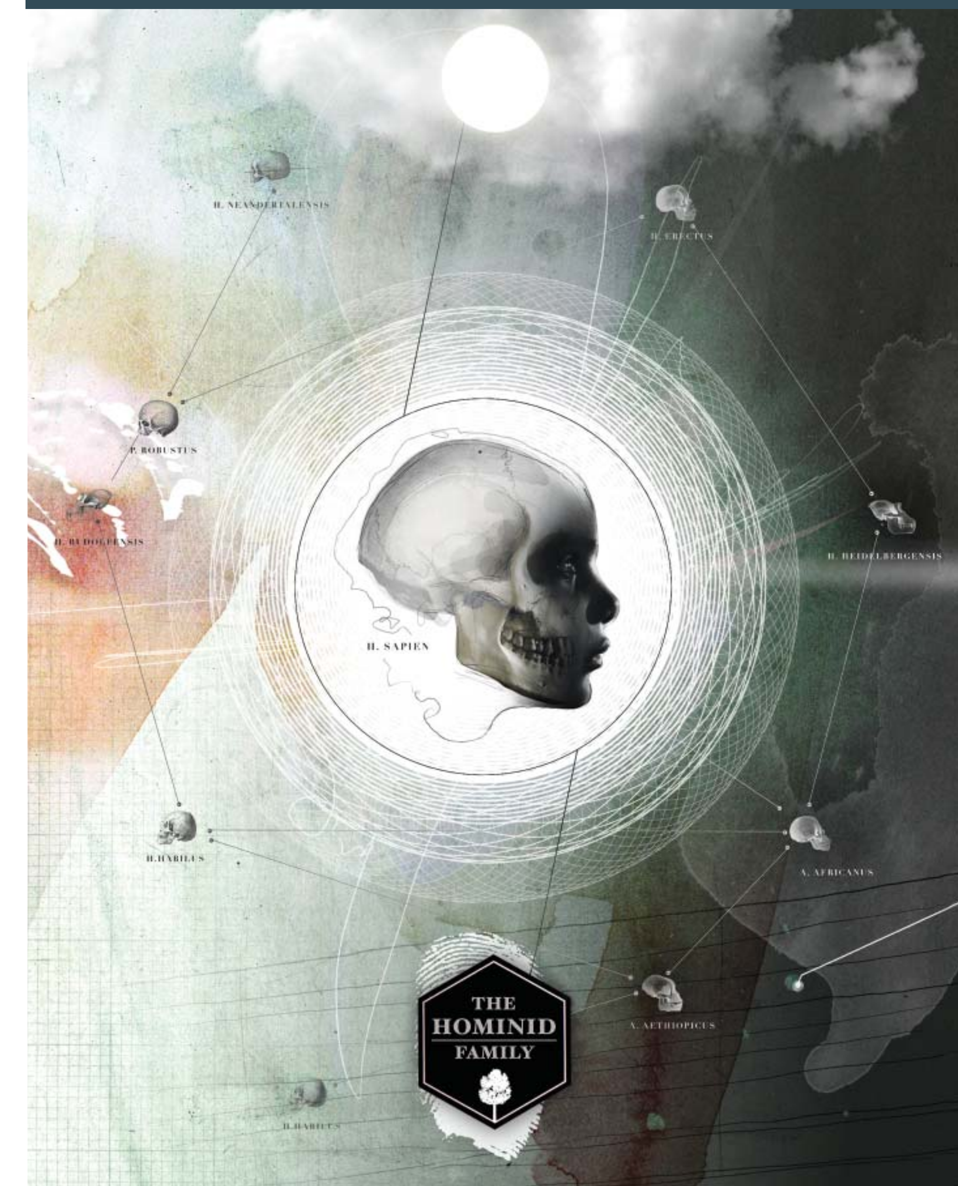
Otra hipótesis afirma que la evolución genética prosigue todavía hoy, pero a la inversa. Ciertas características de la vida moderna pueden provocar cambios evolutivos que dificulten nuestra supervivencia, si no la cuestionan. Multitud de estudiantes universitarios viven en su propia piel las consecuencias de ese tipo de evolución "inadaptativa": dejan la reproducción para más adelante, mientras muchos de sus compañeros de instituto que no han ido a la universidad empiezan enseguida a tener hijos. Si los padres menos inteligentes son los que tienen más descendencia, entonces la inteligencia constituye una desventaja darwinista en el mundo actual; la inteligencia promedio podría evolucionar a la baja.

La historia de esos razonamientos es larga y controvertida. Aduce uno de los numerosos contraargumentos que la inteligencia humana comprende diversas facultades codificadas por un número extenso de genes; es, por tanto, heredable en un grado bajo. La selección natural opera sólo sobre rasgos heredables. Se mantiene vivo el debate sobre la heredabilidad de la inteligencia [*véase* "Genética de la inteligencia", por Carl Zimmer; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008]. Las investigaciones no han detectado ninguna disminución de la inteligencia promedio.

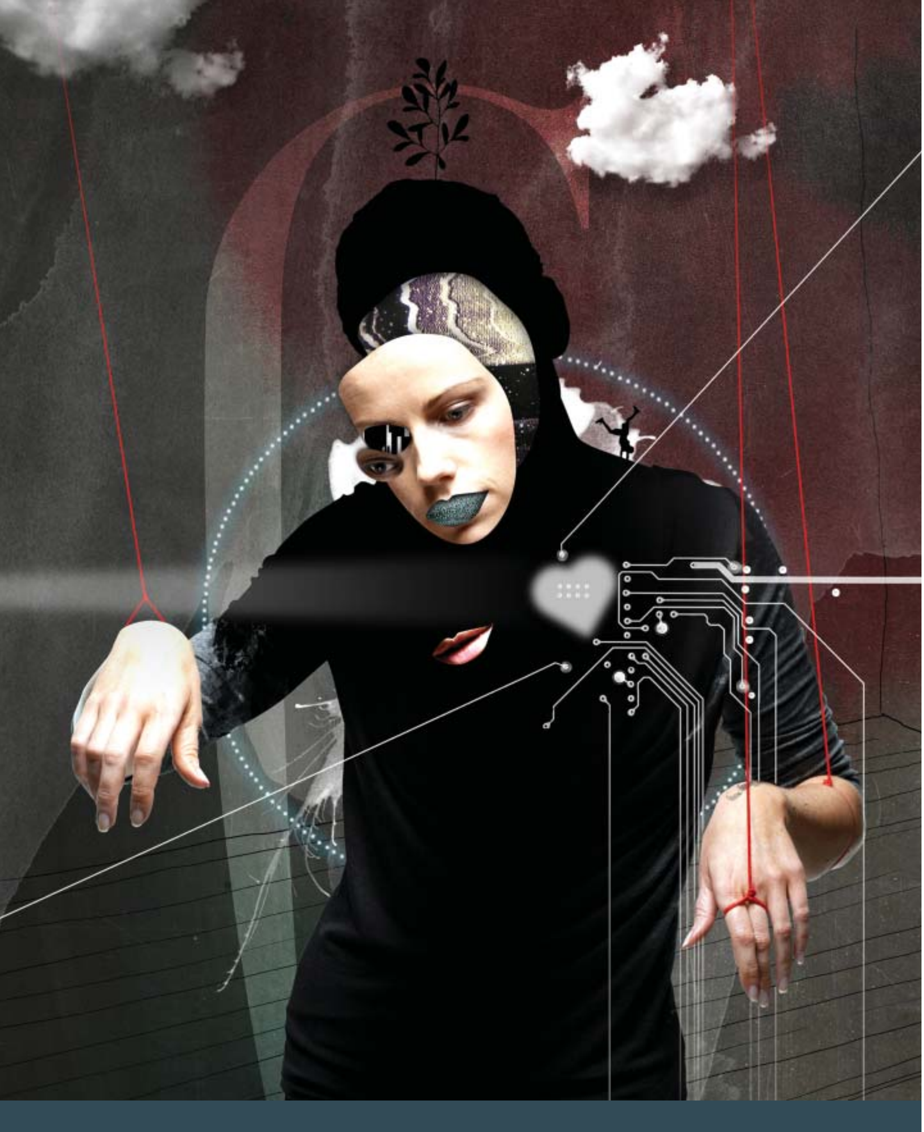
Algunos científicos piensan que podrían acumularse en la especie humana otros caracteres más heredables, pero perjudiciales. Ciertos trastornos de la conducta (el síndrome de Tourette y el de hiperactividad por déficit de atención o TDAH) podrían ser codificados por un número reducido de genes y ser, por tanto, heredables en alto grado. Si tales alteraciones aumentaran la probabilidad de tener hijos, destacarían más en cada nueva generación. Según David Comings, del Instituto de Investigación Beckman, esas condiciones se dan ahora con mayor frecuencia que antes, lo que podría deberse a la evolución: las mujeres que sufren tales síndromes no suelen ir a la universidad, lo que aumenta la probabilidad de que tengan más hijos que las demás. Otros expertos presentan graves objeciones a la teoría de Comings; no existen pruebas que demuestren un aumento de la incidencia del Tourette y del TDAH. Además, las investigaciones sobre esos trastornos entrañan una gran dificultad por el estigma social que afecta a quienes los sufren.

Aunque los ejemplos anteriores no superan un examen científico, la línea básica de razonamiento resulta en cierta medida plausible. Tendemos a pensar que la evolución implica una modificación estructural, sin reparar en que afecta también a la conducta. Muchos individuos llevan genes que les hacen propensos al alcoholismo, la drogadicción u otros trastornos. La mayoría de ellos no sucumbe, porque los genes no imponen un destino (su efecto depende del entorno). Pero otros sí. Sufren entonces trastornos que pueden incidir en la supervivencia y en el número de hijos que tengan. Esas alteraciones de la fertilidad bastan para que opere el influjo de la selección natural. Gran parte de la evolución futura de la humanidad podría comportar nuevas conductas que se extiendan como respuesta a las cambiantes condiciones sociales y ambientales. Por supuesto, la especie humana se diferencia de las demás en que no tiene que aceptar pasivamente la lógica darwinista.

En los últimos 10.000 años la evolución humana ha sido hasta 100 veces más rápida que en cualquier época anterior.



NESSIM HIGSON (*fotoilustración*); ISTOCKPHOTO.COM (*cráneo y cabeza de niño*)



Si la eficacia de las máquinas se convirtiera en la medida de la aptitud evolutiva, quedaría desterrado mucho de lo que consideramos quintaesencia de lo humano.

Evolución dirigida

¿Por qué no dirigir nuestra evolución como hemos hecho con la de tantos animales y vegetales? ¿Por qué esperar a que la selección natural desarrolle su tarea cuando nosotros podemos hacerlo más deprisa y de un modo que nos beneficie? En el área de la conducta humana, los biólogos rastrean los componentes genéticos no sólo de los trastornos sino también de la sexualidad y la competitividad, muchos de los cuales podrían ser heredables, al menos en parte. Andando el tiempo, quizá sea moneda común tamizar la dotación genética del paciente y ofrecerle fármacos personalizados.

La etapa siguiente consistirá en cambiar los genes de las personas. Pueden cambiarse los genes sólo en el órgano afectado (terapia génica somática) o alterar el genoma entero (terapia génica germinal). Los investigadores batallan todavía con la terapia génica somática para curar enfermedades. Pero si logran algún día extenderla a las células germinales (óvulos y espermatozoides), no sólo se ayudará al afectado, sino también a su descendencia. El principal obstáculo que hallará la ingeniería genética en nuestra especie será la complejidad del genoma humano. Los genes suelen realizar más de una función; a la inversa, las funciones acostumbran estar codificadas por más de un gen. Debido a esa propiedad, denominada pleiotropía, manipular un gen puede acarrear consecuencias insospechadas.

¿No hemos de intentarlo siquiera? Las presiones por alterar los genes vendrán de los padres, deseosos de asegurar que su hijo sea niño o niña, guapo, inteligente, con talento musical o buen carácter, o que no sea avieso, depresivo, hiperactivo o se convierta en un criminal. A la irresistible presión paterna por la mejora genética de la prole cabría añadir el combate contra el envejecimiento humano. Numerosos estudios recientes sugieren que la vejez no corresponde tanto a un desgaste del organismo cuanto a una decadencia programada, en buena medida bajo control génico. De ser ello cierto, la próxima centuria de investigación genética podría desbloquear numerosos genes que controlan multitud de aspectos del envejecimiento. Y esos genes podrían manipularse.

Suponiendo que el cambio de nuestros genes fuera factible, ¿cómo afectaría a la futura evolución de la humanidad? Probablemente tendría un fuerte impacto. Supongamos que los padres manipularan a sus hijos en las primeras fases de su vida para potenciar su inteligencia, vigor físico y longevidad. Si los chicos fueran tan inteligentes como longevos (cociente intelectual de 150 y esperanza de vida de 150 años) tendrían más hijos y acumularían más éxitos que el resto de nosotros. Probablemente serían atraídos por otros de sus mismas características. Con cierta segregación geográfica o social que se autoimpusieran, sus genes podrían derivar y diferenciarse por fin en una nueva especie. Algún día, pues, estaría en nuestras manos traer al mundo una nueva especie humana. Nuestros descendientes deberán elegir si deciden seguir ese camino.

Futuro cibernético

Aún más difícil de prever que nuestro uso de la ingeniería genética es el que hagamos de las máquinas o el que ellas ejerzan sobre nosotros. ¿Acaso la evolución final de nuestra especie tenderá a una simbiosis con las máquinas, una síntesis humano-máquina? Muchos escritores de fantasía científica han predicho la vincula-

NESSIM HIGSON (*fotoilustración*); AMANA PRODUCTIONS *Getty Images* (*mujer*)

ción de nuestros organismos con robots o la descarga de nuestros cerebros en ordenadores. A decir verdad, nuestra dependencia de las máquinas es ya una realidad: igual que las fabricamos para satisfacer necesidades humanas, hemos estructurado nuestras vidas y comportamientos para atender las suyas. Puesto que las máquinas son cada vez más complejas y están más interconectadas, forzosamente habrá que acomodarse a ellas. Opinión que expuso con toda crudeza George Dyson en su libro de 1998 *Darwin among the Machines* (Darwin entre las máquinas): "Todo lo que están haciendo los humanos para facilitar el manejo de las redes de ordenadores, facilita al propio tiempo, aunque por razones distintas, que los humanos sean manejados por las redes informáticas… La evolución darwinista, en una de esas paradojas que tanto abundan en la vida, puede ser víctima de su propio éxito, al no poder seguir el ritmo de los procesos no darwinistas que ha generado".

Nuestros logros técnicos amenazan inundar los viejos caminos de la evolución. Consideremos dos visiones del futuro que aparecen en un ensayo de Nick Bostrom, de la Universidad de Oxford, de 2004. El enfoque optimista propone: "A grandes rasgos, apreciamos una tendencia dominante hacia niveles superiores de complejidad, conocimiento, consciencia y organización dirigida y coordinada; tendencia que, sin aquilatar demasiado, podemos denominar 'progreso'. Según esa visión panglossiana, el registro de los éxitos anteriores ofrece argumentos sólidos para creer que la evolución (ya sea biológica, memética o técnica) seguirá encauzada en las direcciones deseables".

Señalemos, no obstante, que esa referencia al "progreso" seguramente estremecería a Steven Jay Gould. Sostenía Gould que los fósiles, incluidos los de nuestros antepasados, nos enseñan que el proceso de la evolución no es continuo, sino que experimenta pulsos de actividad y períodos de estasis ("equilibrio puntuado"). No es "progresivo" ni direccional. Los organismos tan pronto crecen como se achican. Pero la evolución se ha demostrado al menos en una dirección: la del aumento de la complejidad. Quizá sea ése el destino de la evolución humana: una complejidad mayor a través de cierta combinación de anatomía, fisiología y conducta. Si continuamos la adaptación (y emprendemos una hábil ingeniería planetaria), no hay razones de índole genética o evolucionista para que nuestra especie no permanezca hasta ver apagarse el Sol. A diferencia del envejecimiento, la extinción no parece estar programada en los genes de ninguna especie.

Bostrom propone otra visión, más oscura, que nos resulta demasiado familiar: la ruina que nos causaría la carga de nuestros cerebros en ordenadores. La inteligencia artificial avanzada encapsularía los diversos componentes de la cognición humana y los ensamblaría en algo que ya no sería humano, y que nos tornaría obsoletos. Bostrom predice el siguiente curso de acontecimientos: "Algunos individuos cargan y elaboran numerosas copias de sí mismos. Mientras tanto, se produce un progreso gradual en neurociencia e inteligencia artificial; al final se hace posible aislar módulos cognitivos individuales y conectarlos a módulos procedentes de otras mentes descargadas… Los módulos que se acomoden a un patrón común serán más capaces de comunicarse y cooperar con otros módulos y, por tanto, más productivos económicamente, creando una presión a favor de la estandarización… Tal vez no haya lugar para arquitecturas mentales del tipo humano".

Como si la obsolescencia técnica no fuera suficientemente perturbadora, Bostrom termina señalando algo todavía más temible: si la aptitud evolutiva tuviera que medirse por la eficacia de las máquinas, mucho de lo que consideramos quintaesencia de lo humano sería desterrado de nuestro linaje. En sus palabras, "hay extravagancias y diversiones que pretenden dar a la vida humana gran parte de su sentido (humor, amor, juego, arte, sexo, baile, contacto social, filosofía, literatura, descubrimientos científicos, comida, bebida, amistad, familia, deporte) y a las que nos dedicamos preferentemente con predisposiciones que en nuestro pasado evolutivo fueron adaptativas; ¿qué base tenemos para confiar en que esas actividades u otras similares sean adaptativas también en el mañana? Quizá lo que en el futuro extreme su idoneidad sea sólo el trabajo fatigoso y monótono, sin lucimiento, orientado a mejorar el octavo decimal de alguna medida de la producción económica".

En resumen, suponiendo que no vayamos a la extinción, el futuro de la humanidad podría discurrir por uno de varios caminos:

Estasis. Nos quedamos más o menos igual que ahora, con pequeños cambios debidos sobre todo a la fusión de razas.

Especiación. Evoluciona una nueva especie humana en este u otro planeta.

Simbiosis con máquinas. La integración de las máquinas y los cerebros humanos produce una inteligencia colectiva que puede o no mantener las cualidades que hoy reconocemos como humanas.

Quo vadis Homo futurus?

Bibliografía complementaria

FUTURE EVOLUTION. Peter Ward. W. H. Freeman, 2001.

THE FUTURE OF HUMAN EVOLUTION. Nick Bostrom en *Death and Anti-Death: Two Hundred Years after Kant, Fifty Years after Turing*, preparado por Charles Tandy. Ria University Press, 2004.

A MAP OF RECENT POSITIVE SELECTION IN THE HUMAN GENOME. Benjamin F. Voight, Sridhar Kudaravalli, Xiaoquan Wen y Jonathan K. Pritchard en *PLoS Biology*, vol. 4, n.º 3, págs. 0446-0458; 7 de marzo, 2006.

GENOME-WIDE DETECTION AND CHARACTERIZATION OF POSITIVE SELECTION IN HUMAN POPULATIONS. Pardis C. Sabeti et al. en *Nature*, vol. 449, págs. 913-918; 18 de octubre, 2007.

NATURAL SELECTION HAS DRIVEN POPULATION DIFFERENTIATION IN MODERN HUMANS. L. B. Barreiro, G. Laval, H. Quach, E. Patin y L. Quintana-Murci en *Nature Genetics*, vol. 40, n.º 3, págs. 340-345; marzo, 2008.

THE 10.000 YEAR EXPLOSION: HOW CIVILIZATION ACCELERATED HUMAN EVOLUTION. Gregory Cochran y Henry Harpending. Basic Books, 2009.

Evolución virtual

Un juego de ordenador revela las diferencias entre la construcción de criaturas simuladas y la selección natural

Ed Regis

Cuando Will Wright estaba desarrollando Spore, su muy alabado juego de ordenador, se entrevistó con varios científicos y biólogos. Necesitaba saber el modo en que la naturaleza había efectuado lo que él trataba de remedar en su juego: entre otras cosas, el desarrollo de los primeros estadios de la vida y de su evolución. (Ciertos anuncios del juego rezan: "En Spore.com comienza la Evolución".) Entre los expertos consultados por Wright se cuentan Michael Levine, genético de la Universidad de California en Berkeley, Neil Shubin, paleontólogo de la Universidad de Chicago, y Hansell Stedman, cirujano de la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania.

Pese a toda la investigación previa que se llevó a cabo para el desarrollo de este juego, la traducción que Spore nos ofrece de los procesos internos de la evolución por selección natural muestra luces y sombras. A favor del juego diremos que en éste existe, como en el mundo real, competición entre individuos: la conocida "lucha por la existencia" de Darwin. Los más aptos sobreviven y los menos aptos se extinguen, replicando así el principio evolutivo fundamental, la supervivencia de los más aptos. En el juego y en la vida real, las entidades simples se desarrollan y convierten en otras más complejas, una pauta característica y frecuente, aunque no inevitable, en la evolución darwinista. Finalmente, en Spore y en la naturaleza, los seres vivos tienden a presentar simetría bilateral, aunque hallemos excepciones en ambos entornos (amebas en la vida real y algunos de los organismos unicelulares en Spore).

Spore abarca cinco estadios de desarrollo: célula, criatura, tribu, civilización y espacio. Pero existen varias diferencias importantes entre el funcionamiento real de la evolución y la versión, excelentemente animada, que ofrece Spore de los acontecimientos. Para empezar, en los estadios "célula" y "criatura" del juego, los organismos ganan "puntos de ADN" cuando alcanzan ciertas metas. La evolución hasta estadios superiores depende de la adquisición de puntos de ADN (algo así como los puntos que acumulan los viajeros de las compañías aéreas para dirigirse después a cierto destino). En el mundo real, en cambio, los organismos evolucionan por mutaciones genéticas aleatorias, por reproducción sexual y por otros mecanismos, pero no por la mera acumulación de ADN.

En segundo lugar, en muchos momentos decisivos del juego, se ofrece sólo una reducida gama de opciones y es obligado elegir entre ellas desde un menú predefinido que las enumera. En el estadio celular, por ejemplo, debe elegirse entre el desarrollo de un carnívoro o un herbívoro. En el mundo real, el abanico de posibilidades en cualquier punto de ramificación del árbol evolutivo es enormemente mayor, mucho más rico y más indefinido.

La evolución avanza con parsimonia, a pequeños pasos. Aunque los teóricos debaten sobre el valor preciso de las tasas de cambio evolutivo, Spore avanza, en comparación, a la velocidad de la luz; en muchas ocasiones con saltos enormes, pues se injertan órganos o miembros completos del cuerpo (manos, pies, mandíbulas, ojos, extremidades) en un organismo y se integran sin tropiezos en su funcionamiento. Esos milagros son ejecutados por un "editor de criaturas", una aplicación que permite al usuario elegir en una paleta de elementos corporales prefabricados y previamente ensamblados, que pueden incorporarse a un organismo mediante unas pocas y ágiles pulsaciones del ratón. Los diversos elementos disponibles en esos repertorios de piezas no han llegado allí por evolución, desde luego, sino que han sido diseñados y almacenados en estas "cajas de repuestos" por los creadores del juego.

La evolución corresponde a un proceso de ramificación con múltiples líneas de descendencia, que operan de forma simultánea y paralela. Si actúa sólo un jugador, Spore es, en esencia, lineal y unidimensional; el jugador controla sólo las actividades de una célula o criatura. (En el estadio "tribal", el jugador controla la conducta de varios individuos de la tribu, pero éstos se encuentran entonces biológicamente fijados y ya no experimentan cambios que afecten a su forma o dimensiones.) Si se juega "en línea", el jugador interactúa con otros jugadores y puede descargar las creaciones de éstos desde una "esporopedia", integrada por una variopinta colección de seres vivos y objetos inanimados (edificios, vehículos,

ELECTRONIC ARTS (*criaturas de Spore*); MATT COLLINS (*Darwin en el ordenador*)

música, etcétera). Gracias a esa característica, Spore alcanza cierto paralelismo con lo que hallamos en la naturaleza.

Ello nos hace ver la máxima diferencia entre Spore y la evolución por selección natural: mientras que la evolución opera sin un "seleccionador" consciente, Spore sí lo tiene. Es el jugador quien efectúa la selección y se decanta a favor o en contra de ciertas cosas en cada encrucijada de caminos: partes del cuerpo, rasgos, comportamientos, colores, texturas, pelajes, formas. En realidad, Spore no procede en absoluto por selección natural, sino por selección artificial. De hecho, al situar el jugador en la posición de creador omnipotente, el juego constituye en mayor medida una simulación del "diseño inteligente" que de la selección natural darwinista.

Spore puede muy bien llegar a ser el juego de ordenador definitivo que señale el máximo nivel en la animación informática. Es igualmente posible que el lector lo encuentre fascinante o aburrido, refinado o bobo, o que le recuerde más a Disney que a Darwin.

No obstante, es un entretenimiento especialmente atractivo para algunas personas. Frank Drake, especialista en astronomía planetaria, creador de la fórmula de Drake para estimar el número de civilizaciones extraterrestres que pudiera albergar nuestra galaxia, opina que es un buen juego para los chicos. Servirá para llevarles la idea de que las criaturas de la Tierra (o de cualquier otro lugar) no siempre han sido las mismas, que las especies llegan y se van, y que, en general, la complejidad de los seres vivos ha ido aumentando con el tiempo. Ello, a su vez, debería servir de estímulo a muchos de ellos para estudiar ciencias, lo cual, a final de cuentas, sería lo más provechoso del juego.



Nueva visita al problema de los tres dioses

Una nueva resolución del problema lógico más difícil de la historia nos permite plantear un desafío todavía mayor

Gabriel Uzquiano

Juan M. R. Parrondo dedicaba estas mismas páginas, en junio de 2008, a exponer y resolver "el problema lógico más difícil de la historia", que había planteado George Boolos en 1996. Aquí vamos a utilizar una técnica general que se puede aplicar a muchos de los acertijos de escuderos mentirosos y caballeros sinceros, tan popularizados por los excelentes libros de Raymond Smullyan. Concluiremos con dos variaciones todavía más difíciles del problema de los tres dioses. Una de ellas nos permitirá reflexionar más adelante acerca de si es posible optimizar la resolución del problema original.

Recordemos el enunciado del problema:

Hay tres dioses A, B y C. Uno siempre dice la verdad, uno siempre miente y otro responde de manera completamente aleatoria. Nuestra tarea consiste en determinar las identidades de A, B y C por medio de no más de tres preguntas cuya respuesta deba ser "sí" o "no", cada una de las cuales habrá de dirigirse a un solo dios. Aunque cada uno de los dioses entiende el castellano, van a responder en su propia lengua con una de las palabras 'da' o 'ja', que significan "sí" o "no". Desafortunadamente, no sabemos qué palabra significa "sí" y qué palabra significa "no".

Y recordemos que:

- Se puede hacer más de una pregunta a cada dios.
- Podemos hacer que la segunda o tercera pregunta dependan de cuáles hayan sido las respuestas a las preguntas anteriores.
- Que uno de los dioses responda "ja" o "da" depende de un proceso completamente aleatorio. Por ejemplo, del lanzamiento de una moneda al aire; si la moneda cae cara, entonces la respuesta es "da" y si cae cruz, "ja".

Tal vez convenga distinguir dificultades diferentes a la hora de resolver el problema. Una de ellas tiene que ver con la aleatoriedad de las respuestas de uno de los dioses. Otra concierne al problema de cómo extraer información de un dios del que sólo sabemos que o bien siempre dice la verdad, o bien siempre miente. Esta dificultad es común a muchos de los acertijos popularizados por Smullyan. Finalmente, nos enfrentamos al problema adicional de cómo extraer información de dioses cuyas respuestas son "ja" o "da" cuando no sabemos qué palabra significa "sí" y qué palabra significa "no".

Empecemos con el segundo problema. Supongamos que sabemos que nos dirigimos o bien al dios de la verdad, o bien al dios de la mentira, y que ambos han accedido a responder en castellano. Supongamos, por utilizar el ejemplo de Boolos, que nos es preciso averiguar si Dushanbe se encuentra en Kirguistán pero disponemos tan sólo de una pregunta cuya respuesta debería ser "sí" o "no". Parece claro que hacer la siguiente pregunta nos abocaría al fracaso:

¿Se encuentra Dushanbe en Kirguistán?

Supongamos que la respuesta es "sí". Si supiéramos que nuestro interlocutor dice siempre la verdad, entonces podríamos deducir que Dushanbe está en Kirguistán. Por otro lado, si supiéramos que nuestro interlocutor siempre miente, podríamos deducir que Dushanbe no se encuentra en Kirguistán. Pero como no sabemos quién es quién no parece que podamos deducir nada de su respuesta.

Sin embargo, merece la pena detenerse a pensar cómo responderían ambos dioses a preguntas acerca de cómo responderían a ciertas preguntas de las que ya conocemos la respuesta. Consideremos la siguiente pregunta:

¿Responderías "sí" a la pregunta de si París se encuentra en Francia?

Como el dios que dice siempre la verdad respondería que sí a la primera pregunta, parece que debería responder que sí a la última pregunta. Curiosamente, el dios que siempre miente también debería responder que sí a la pregunta. Al fin y al cabo, este dios siempre miente y sabemos que respondería que no a la pregunta de si París se encuentra en Francia:

	¿Se encuentra París en Francia?	¿Responderías "sí" a la pregunta de si París se encuentra en Francia?
Dios de la verdad	Sí	Sí
Dios de la mentira	No	Sí

En general, si *e* es un enunciado verdadero, entonces tanto un dios como el otro deberían responder "sí" a la pregunta de si responderían "sí" a la pregunta de si *e* es cierto.

Se sigue de lo anterior que si *ambos dioses* se dignaran responder en castellano, entonces podríamos deducir la respuesta a la pregunta de si Dushanbe está en Kirguistán a partir de su respuesta a la siguiente pregunta:

¿Responderías "sí" a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Si nuestro interlocutor responde "sí", entonces, sea quien sea, Dushanbe se encuentra en Kirguistán. Si responde "no", entonces no. Esta técnica es completamente general y puede utilizarse para resolver muchos de los acertijos de escuderos mentirosos y caballeros sinceros.

Siguiente problema. Aunque tuviéramos la fortuna de dirigirnos a uno de los dioses que no responde de manera aleatoria, sabemos que van a responder "ja" o "da" a nuestra pregunta y seguiremos sin saber qué palabra significa "sí" y que palabra significa "no". Basta ahora con notar una cierta simetría entre "sí" y "no". Pensemos, en particular, en cómo responderían los dioses a la siguiente pregunta si se dignaran hacerlo en castellano:

¿Responderías “no” a la pregunta de si París se encuentra en Francia?

Como el dios que dice siempre la verdad respondería que sí a la primera pregunta, parece que debería responder que no a nuestra pregunta. Curiosamente, el dios que siempre miente también debería responder que no a la misma pregunta. Al fin y al cabo, éste siempre miente y sabemos que respondería que sí a la pregunta de si París se encuentra en Francia.

	¿Se encuentra París en Francia?	¿Responderías “no” a la pregunta de si París se encuentra en Francia?
Dios de la verdad	Sí	No
Dios de la mentira	No	No

En general, si *e* es un enunciado verdadero, entonces tanto un dios como el otro deberían responder “no” a la pregunta de si responderían “no” a la pregunta de si *e* es cierto. Por tanto, otra manera de obtener información sobre la situación de Dushanbe sería por medio de la pregunta:

¿Responderías “no” a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Si nuestro interlocutor responde “no”, entonces Dushanbe se encuentra en Kirguistán. Si responde “sí”, entonces no.

Esta es la clave para averiguar si Dushanbe se encuentra en Kirguistán aun cuando nuestro interlocutor insista en utilizar “da” o “ja”. Basta con preguntar:

¿Responderías “da” a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Asia?

Aunque no sepamos qué significa la palabra ‘da’, sabemos ahora que ambos responderán “da” únicamente en caso de que Dushanbe se encuentre en Kirguistán. Si no, entonces ambos dioses responderán “ja”.

Queda una dificultad. Digamos que un dios es aleatorio si sus respuestas son aleatorias. Sabemos cómo extraer información del dios que dice siempre la verdad y del dios que siempre miente, pero no, desafortunadamente, del dios que es aleatorio. Por tanto, debemos usar nuestra primera pregunta para identificar un dios que no sea aleatorio a fin de extraer más información del mismo.

Solución

(1) Dirigida a B:

¿Responderías “da” a la pregunta de si A es aleatorio?

Si *B* es aleatorio, entonces responderá “da” o “ja” de manera aleatoria. Si no, entonces responderá “da” si *A* es aleatorio y “ja” si no lo es. Por tanto, si *B* responde “da”, o bien *A* es aleatorio, o bien *B* lo es; *C*, por tanto, no lo es. Y si *B* responde “ja”, o bien *C* es aleatorio, o bien *B* lo es; *A*, por tanto, no lo es. En cualquiera de los casos, la respuesta de *B* nos permite identificar a un dios que no es aleatorio que es a quien debemos dirigir nuestra segunda pregunta.

(2) Dirigida a un dios que sabemos no es aleatorio:

¿Responderías “da” a la pregunta de si siempre dices la verdad?

Si responde “da” entonces sabemos que se trata del dios que siempre dice la verdad. Si responde “ja”, entonces se trata del dios que siempre miente.

(3) Dirigida al mismo dios al que hemos dirigido (2):

¿Responderías “da” a la pregunta de si *B* es aleatorio?

Si la respuesta es “da”, entonces *B* es aleatorio. Si no, el dios restante es aleatorio y sabremos quién dice la verdad y quién miente.

Parecería que una resolución que consista de tres preguntas es óptima. Como hay tres dioses, *A*, *B* y *C*, existen al menos seis combinaciones diferentes: VMA, VAM, AVM, AMV, MVA, MAV. Pero una pregunta cuya respuesta sea “sí” o “no” sólo podría eliminar la mitad de las posibilidades que permanecen en juego en cada ocasión. Por tanto, con dos preguntas no podríamos resolver problemas con más de cuatro posibilidades iniciales.

¿O tal vez sí? Quizá sea útil pensar en variaciones más difíciles si cabe del problema de los tres dioses. Una de ellas nos permitirá reflexionar más adelante acerca de la cuestión de si es posible optimizar la resolución del problema original. La primera variante es ésta:

Hay tres dioses, A, B y C. Dos de ellos no son aleatorios, pero no sabemos si ambos dicen siempre la verdad, o siempre mienten, o si uno dice siempre la verdad y el otro siempre miente. El tercer dios responde de manera completamente aleatoria. ¿Podríamos determinar el comportamiento de cada dios en sólo tres preguntas cuya respuesta sea “sí” o “no”? Como siempre, aunque los dioses entienden el castellano, van a responder en su propia lengua con una de las palabras ‘da’ o ‘ja’, que significan ‘sí’ o ‘no’. Desafortunadamente, no sabemos qué palabra significa ‘sí’ y qué palabra significa ‘no’.

La segunda variante parece más difícil todavía:

Hay tres dioses, A, B y C. Uno dice siempre la verdad o siempre miente, pero no sabemos qué. Los dos dioses restantes responden de manera completamente aleatoria. ¿Podríamos determinar el comportamiento de cada dios en sólo tres preguntas cuya respuesta sea “sí” o “no”? Como siempre, aunque los dioses entienden el castellano, van a responder en su propia lengua con una de las palabras ‘da’ o ‘ja’, que significan ‘sí’ o ‘no’. Desafortunadamente, no sabemos qué palabra significa ‘sí’ y qué palabra significa ‘no’.

La mayor dificultad en este último problema estribaría en identificar al dios no aleatorio, ya que sabemos que cualquier pregunta a un dios aleatorio apenas va a permitirnos recabar información alguna. La técnica que utilizamos en la resolución del problema de Boolos parecería ser de ayuda a la hora de resolver la primera variación del problema de los tres dioses, pero no cuando nos enfrentamos a dos dioses aleatorios.

Tal vez sea el momento de preparar una buena cafetera... Por cierto, Dushanbe se encuentra en Tayikistán, no en Kirguistán.

¿Quiere saber más?

El problema lógico más difícil de la historia fue planteado por George Boolos en “The Hardest Logic Puzzle Ever” en *Harvard Review of Philosophy* 6: 62-5, 1996 [y ahora, en http://www.hcs.harvard.edu/ hrp/issues/1996/Boolos.pdf]. Los dos últimos problemas aparecen mencionados, pero no resueltos, en Tim Roberts, Some Thoughts on the Hardest Logic Puzzle Ever, *Journal of Philosophical Logic*, 2001. Juan M. R. Parrondo discute la cuestión de si es posible optimizar la solución de Boolos en los números de junio y julio de 2008.

Entre los títulos de Raymond Smullyan que han sido traducidos al castellano se encuentran *La Dama y el Tigre*, *¿Cómo se llama este libro?*, *El Enigma de Sherezade* o *Alicia en el país de las adivinanzas*.

Control adaptativo de crucero

El progreso se acelera

Mark Fischetti

Desde hace decenios existe el control de crucero, vale decir, el sistema que mantiene constante la velocidad de un vehículo. Pero su actualización podría disparar una sucesión de avances que desembocaran en el coche autónomo.

En los controles de crucero comunes, el conductor fija la velocidad que desea. Entonces, el controlador del motor abre el gas para acelerar el coche y lo cierra para aminorar la velocidad aprovechando la resistencia del motor. Unos pocos sistemas mejorados aplican suavemente los frenos si la resistencia del motor no basta; por ejemplo, cuando el vehículo desciende por una bajada a tumba abierta.

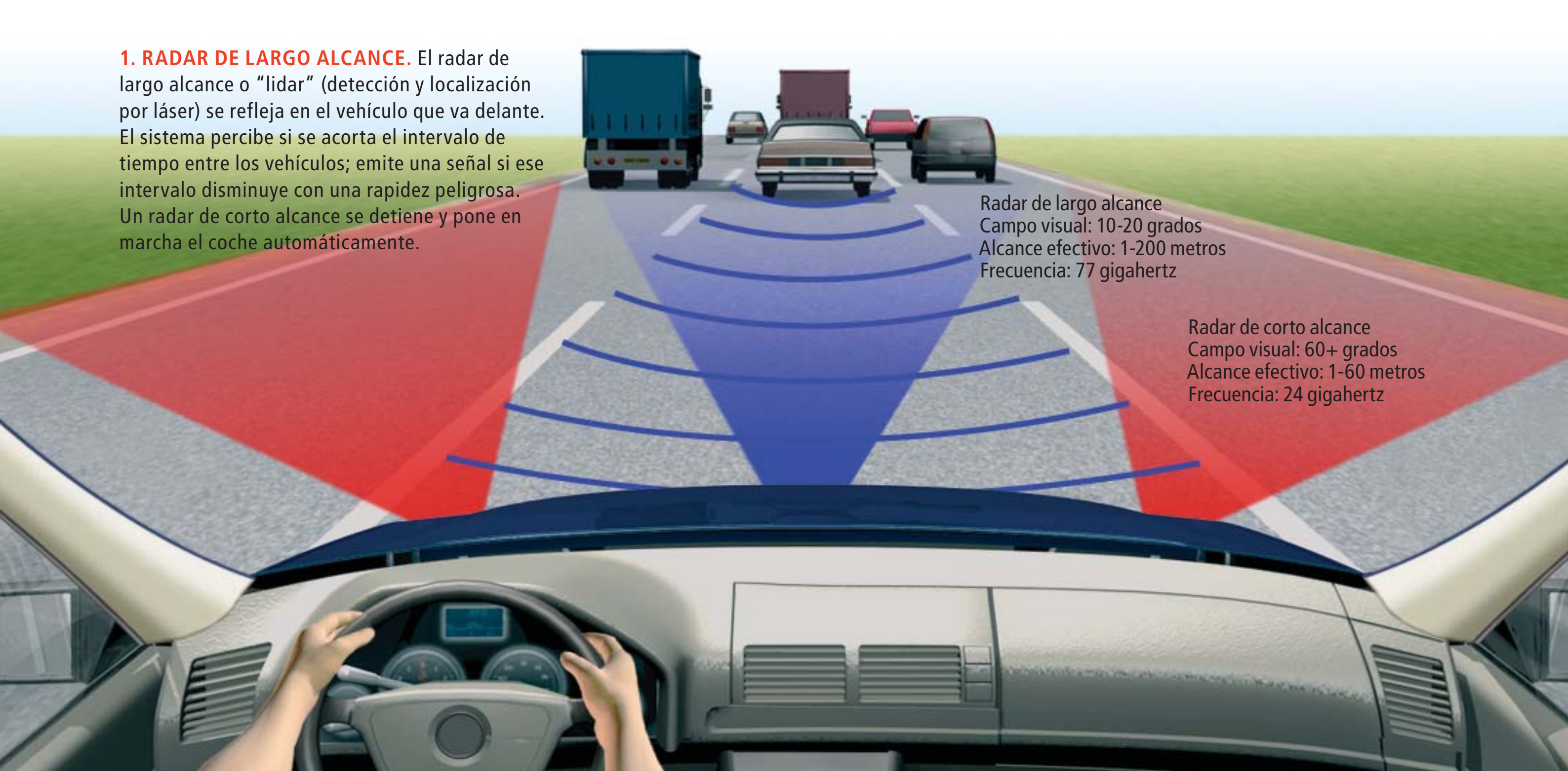
Pero ni uno ni otro sistema saben si el coche se está acercando a otro más lento que vaya delante, lo que obligaría al conductor a pisar el freno. El control de crucero adaptable, que se ofrece ya en algunos modelos, emplea radar o lidar (de *light detection and ranging*, "detección y localización por luz") para rastrear la presencia de vehículos precedentes. El conductor fija una velocidad de marcha y un "intervalo de tiempo", de uno a tres segundos, entre su vehículo y el precedente.

Si el automóvil se aproxima en demasía al que le precede, el sistema aminora la marcha (y, si es necesario, aplica los frenos) para disminuir la velocidad; luego, de forma interrumpida, ajusta la velocidad para mantener un intervalo de tiempo constante entre los dos vehículos. Cuando el vehículo precedente cambia de carril o sale de la carretera, el sistema devuelve el auto a la velocidad prefijada. Si la velocidad del vehículo delantero disminuye por debajo de un umbral (25 kilómetros por hora, por ejemplo), el sistema se desactiva y advierte acústicamente al conductor para que tome los mandos.

Varios fabricantes empiezan a ofrecer el control de crucero adaptable de "arranque-parada" de nueva generación. El sistema puede detener el coche y volver a acelerarlo, una prestación muy útil en el tránsito urbano. En algunos sistemas, si el vehículo se para, para ponerlo otra vez en marcha el conductor debe pisar fugazmente el acelerador o pulsar un botón. Tal maniobra requiere la instalación de un radar de corto alcance, que detecte los vehículos y los peatones, delante y a ambos costados del parachoques frontal.

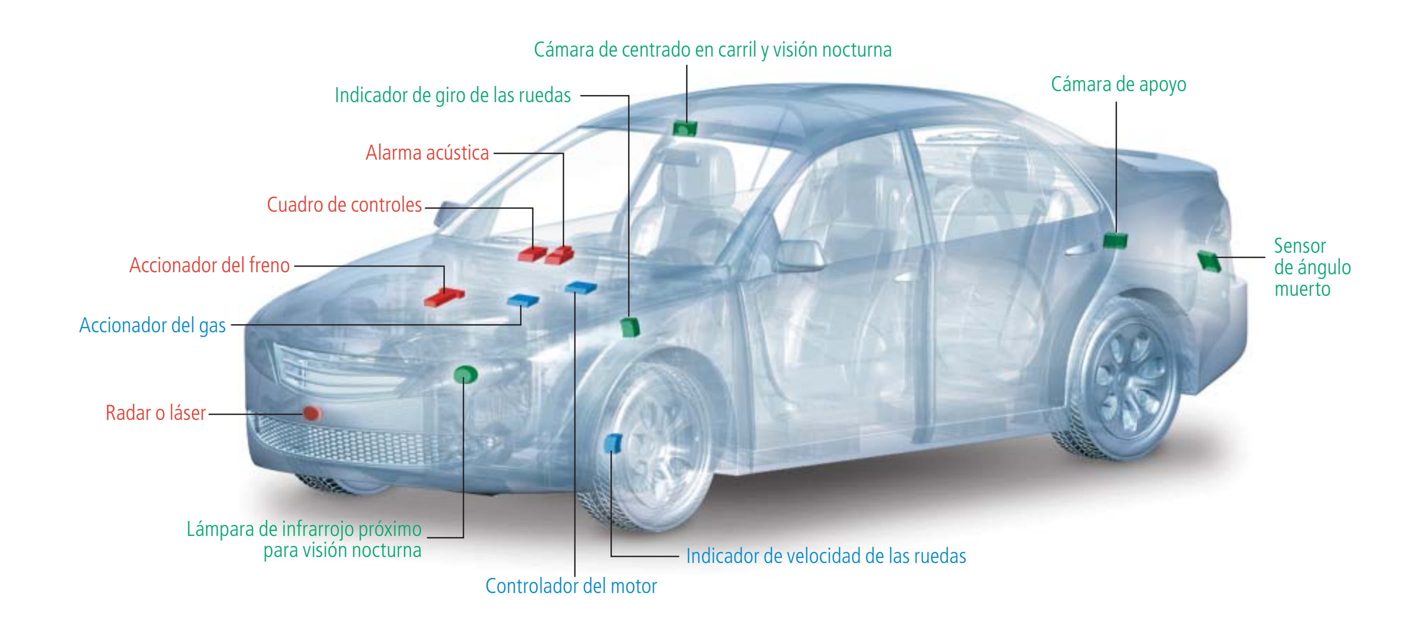
Puede que lo siguiente sean los coches plenamente autónomos. "El control de crucero adaptable facilita el desarrollo de múltiples técnicas de autonomización", explica Michael Thoeny, director de electrónica de seguridad de Delphi Electronics & Safety, de Kokomo (Indiana). La instalación de un sensor de corto alcance en las esquinas traseras de un coche, para eliminar los ángulos muertos, y de una videocámara apuntada hacia delante en el parabrisas, además de un programa de procesado visual, permitiría que el coche se mantuviera en un carril, cambiara de carril sin peligro y evitara en gran medida las colisiones. En ultima instancia, las mismas técnicas podrían conseguir que un grupo de vehículos viajara en fila por un carril de autopista guardando las distancias, aunque para ver tal cosa puede que falten todavía unos diez años.

¿Renunciarán los conductores a tales dosis de control? En la opinión de Andrew Whydell, gerente de planificación de productos de electrónica de seguridad de TRW Automotive, en el condado de West Midlands, nos hallamos en una fase de aprendizaje de doble sentido. Los conductores se encuentran cada vez más a gusto con la electrónica de suplantación y los fabricantes están aprendiendo el modo en que los conductores reaccionan frente a esos sistemas y los usan. Los radares abren posibilidades para nuevas automatizaciones.



1. RADAR DE LARGO ALCANCE. El radar de largo alcance o "lidar" (detección y localización por láser) se refleja en el vehículo que va delante. El sistema percibe si se acorta el intervalo de tiempo entre los vehículos; emite una señal si ese intervalo disminuye con una rapidez peligrosa. Un radar de corto alcance se detiene y pone en marcha el coche automáticamente.

2. CONTROL DE CRUCERO. El control de crucero (*azul*) monitoriza la velocidad de las ruedas; el controlador del motor da más o menos gas para mantener la velocidad prefijada por el conductor. En el control adaptativo de crucero operan además un radar o lidar y otros dispositivos (*rojo*) para realizar un seguimiento de los vehículos que marchan delante; cierra el gas o aplica los frenos para reducir la velocidad del vehículo.



3. OPCIONES FUTURAS. Las opciones futuras (*verde*) que se añadan a las técnicas de control de crucero podrían incluir sensores laterales y traseros para captar los vehículos situados en los ángulos muertos. Una cámara apuntada hacia adelante permitiría al coche mantenerse en su carril y desplegaría en el parabrisas una imagen de visión nocturna para ayudar al conductor a localizar objetos velados por la oscuridad.

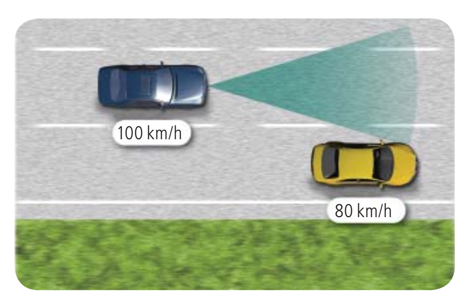
Control de crucero adaptativo



El coche reduce velocidad al acercarse a otro más lento



El coche se atiene a un intervalo de tiempo fijo



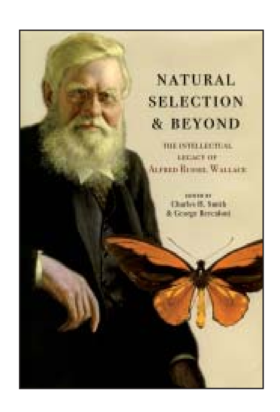
El coche se acelera al alejarse el obstáculo

SW INFOGRAPHICS

¿SABIA USTED QUE...?

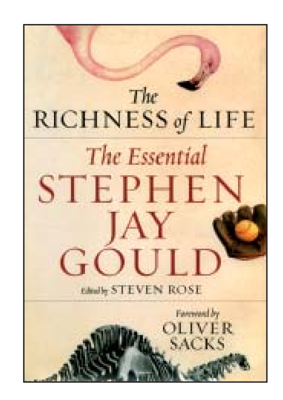
➤ **RADAR O LIDAR:** Los controles de crucero con radar, que suelen ser opcionales, cuestan entre 900 y 1700 euros. Por ello algunos fabricantes han venido empleando el sistema "lidar" (detección y localización por láser), que rebaja el coste a la mitad, por lo menos. Pero el haz láser no se refleja bien en los coches sucios; niebla, lluvia y nieve lo dispersan. Como consecuencia, algunas empresas se están pasando del lidar al radar y, al propio tiempo, confían en que el volumen de producción y unos procesadores de señales digitales más rápidos abaraten los costos.

➤ **BARRIDO AVANTE:** Los actuales radares de control de crucero llevan una antena fija o una antena de exploración mecánica, cuyo giro favorece las mediciones angulares. A los fabricantes les agradaría sustituir ambas variedades por el radar de exploración electrónica, que hace uso de una batería de antenas fijas y algoritmos lógicos para el barrido de haz, proporcionando un campo visual más ancho. Este equipo realizaría también detecciones de largo y corto alcance, eliminando la necesidad de dos sistemas independientes. Hay en el mercado algunas unidades primerizas, pero son muy caras.



NATURAL SELECTION AND BEYOND. THE INTELLECTUAL LEGACY OF ALFRED RUSSEL WALLACE.

Dirigido por Charles H. Smith y George Beccaloni. Oxford University Press; Oxford, 2008.



THE RICHNESS OF LIFE. THE ESSENTIAL STEPHEN JAY GOULD.

Edición preparada por Steven Rose. W.W. Norton; Nueva York, 2008.

Evolucionistas

De ayer y de hoy

Par gloria que Darwin mereció Alfred Russel Wallace, codescubridor de la teoría de la evolución por selección natural. Le reconocieron idéntica gloria quienes instaron a Darwin a no dejarse robar la primogenitura (*Natural Selection and Beyond. The Intellectual Legacy of Alfred Russel Wallace*). "¿Por qué grandes cabezas fracasaron, mientras Darwin y yo dimos con la solución del problema? En primer lugar (y sobre todo, creo yo) porque en nuestra juventud, ambos fuimos entusiastas cazadores de escarabajos", escribió en 1908. Discreparon en no pocos asuntos. Wallace no aceptó nunca la analogía entre selección natural y selección artificial; se mostró siempre reticente a la extensión del modelo de mecanismo de evolución a la selección sexual.

Teórico poderoso y eminente naturalista de campo, además de ameno relator de viajes, aportó a la consolidación de la doctrina una visión novedosa de la distribución de la vida animal, el cromatismo y la especiación geográfica. Entendía el mundo como un todo. En su último libro, *The World of Life*, de 1911, ilustraba el curso de la evolución como un despliegue de un plan divino.

Había nacido en Kensington Cottage el 8 de enero de 1823, en el seno de una familia de clase media. Fue el octavo de nueve hijos, tres de los cuales murieron antes de alcanzar la madurez. Terminados sus estudios primarios en 1837, abandonó las aulas y entró de aprendiz con un topógrafo, junto con su hermano mayor William. En ese oficio trabajó seis años y medio, hasta que, en 1844, fue contratado para dar clases en la escuela parroquial de Leicester. Cae en sus manos el libro de Robert Chambers *Vestiges of the Natural History of Creation*, publicado anónimamente en 1844, y *A Voyage Up the River Amazon*, de William Henry Edwards. Y, sobre todo, conoce a Henry Walter Bates. Pese a ser éste más joven, y ambos autodidactas, su influencia habría de resultar determinante en los planes de Wallace. Hacia comienzos de 1848 le sugiere a Bates emprender una expedición de campo a Brasil, costeada con los especímenes recogidos de insectos, aves y otros animales y vendidos en colecciones privadas o públicas de Europa. A Wallace le movía, por encima de todo, dar con pruebas de la evolución e intentar descubrir el mecanismo subyacente.

Cuando se embarcan en Liverpool, rumbo a Pará (Belem), en abril de 1848, Wallace tiene veinticinco años y Bates veintitrés. En un comienzo trabajaron juntos, pero no tardaron en separarse para cubrir zonas complementarias. Wallace se centró en el Amazonas medio. Cartografió la cuenca de Río Negro. A comienzos de 1852, con la salud resentida, decidió volver a Inglaterra. En la travesía perdió, por culpa de un incendio, preciosas muestras tropicales. A finales de ese mismo año se asentó en Londres, donde escribió *Palm Trees of the Amazon and Their Uses*, publicada en octubre de 1853, y *A Narrative of Travels on the Amazon and Rio Negro*, publicada en diciembre de 1853.

El segundo viaje, ahora hacia el Archipiélago Malayo (Malasia e Indonesia), lo emprende en 1854. Pasó unos ocho años en esa región, realizó decenas de campañas y visitó todas las islas importantes del archipiélago al menos una vez. Borneo fue la primera isla del archipiélago que exploró; se asentó al principio en Sarawak (la actual "Kuching"), donde obtuvo sus principales cazas de insectos, de los que envió más de 25.000 especímenes a Londres. La cosecha de mamíferos de Sarawak fue, en cambio, modesta; recordaba haber recogido 35 especies de mamíferos, entre ellas dos especies de orangután, quince de otros cuadrúmanos y varios Rodentia e Insectívoros. En febrero de 1855, escribió en Sarawak lo que había de ser uno de los escritos más importantes sobre evolución, anterior al descubrimiento de la selección natural: "Sobre la ley que ha regulado la introducción de nuevas especies", que apareció en el número de septiembre de 1855 de *The Annals and Magazine of Natural History*. Declara el postulado en cuestión que toda especie que emerge lo hace coincidiendo en tiempo y espacio con otra especie preexistente y estrechamente emparentada con ella. La "ley de Sarawak" produjo honda impresión en Charles Lyell. Cuando Darwin le explicó su teoría de la selección natural en 1856, le urgió a que la publicara, si no quería que alguien se le adelantara. Darwin aceptó el consejo y en mayo de 1856 comenzó a escribir un resumen de sus ideas con destino a la imprenta. Pero abandonó el proyecto. No por mucho tiempo. En noviembre de 1859 saldría *El origen de las especies*.

En enero de 1858 Wallace arriba a la isla de Ternate. Las excursiones refinaron sus ideas transformistas, culminando en el famoso "ensayo de Ternate", donde propuso su teoría sobre la evolución por selección natural. Se lo envió en forma de carta a Darwin, que la recibió a mediados de junio de 1858. Según la versión admitida, Lyell y Joseph Hooker, amigos de Darwin, decidieron presentar

el escrito de Wallace junto con textos inéditos de Darwin sobre el particular en la inmediata sesión de la Sociedad Linneana del primero de julio de 1858. Ambos documentos se publicaron el 20 de agosto del mismo año en una pieza conjunta titulada "Sobre la tendencia de las especies a formar variedades; y sobre la perpetuación de las variedades y de las especies por el método natural de selección". La aportación de Darwin precedía al texto de Wallace, resaltando así la primacía de aquél. Wallace recordaría más tarde que el artículo apareció sin su conocimiento y sin que pudiera corregir las galeradas, contradiciendo así las palabras introductorias de Lyell y Hooker que afirmaban que ambos autores habían dejado los textos en sus manos.

De su labor de campo en el archipiélago dan cuenta los propios números: cazó unos 110.000 insectos, 7500 moluscos, 8050 aves y 410 especímenes de mamíferos y reptiles. Un millar largo de especies resultaron nuevas para la ciencia. Casado en 1866, buscó el sustento en la sucesión de trabajos que iría publicando: *The Malay Archipielago* (1869), *On Miracles and Modern Spiritualism* (1875), *The Geographical Distribution of Animals* (1876), *Island Life* (1880), *Land Nationalisation* (1882), *Bad Times* (1885), *Darwinism* (1889), *Natural Selection and Tropical Nature; Essays on Descriptive and Theoretical Biology* (1891), *The Wonderful Century* (1898), *Man´s Place in the Universe* (1903), *My Life* (1905), *Is Mars Habitable?* (1907), *The World of Life* (1910), *Social Environment and Moral Progress* (1913), *The Revolt of Democracy* (1913).

Para descifrar el mecanismo de la evolución, Wallace se mostraba tenaz en reunir un amplio repertorio de especies de un mismo grupo, pertenecientes, además, a lugares muy dispares. Su experiencia naturalista en tres continentes le convenció de la variación entre especies y de la variabilidad intraespecífica. Se afanaba por identificar el prototipo genuino de una especie y lo que no iba más allá de variedad. Su concepción evolutiva del mundo orgánico se evidencia con nitidez en un escrito de 1856, "Por una disposición natural de las aves", donde propone la ordenación de grupos de Paseriniformes (Scansores y Fissiorostres) basada en la afinidad en puntos esenciales de estructura y economía. En vez de admitir divisiones fijas entre grupos, Wallace tomó como "artículo de fe zoológica" que el Sistema Natural se encuentra armoniosamente interconectado mediante relaciones graduales de modificación, de las cuales sólo podemos observar los fragmentos ahora existentes. Se mostraba inclinado hacia una interpretación evolutiva del Sistema Natural. En 1858 descubre, como una alucinación en medio de un episodio de fiebre malárica, el mecanismo de la transmutación, esquematizado en el ensayo "Sobre la tendencia de las variedades a alejarse indefinidamente del tipo original". Subraya la lucha por la existencia y la selección individual, así como la sustitución de las especies progenitoras por las modificadas. La teoría evolutiva de Wallace expuesta en 1858 describe la selección sobre variedades o razas. Por contra, en la teoría de Darwin, la selección opera sobre individuos.

La evolución celebra este año de 2009 otra efeméride, el trigésimo aniversario de un artículo cuya aparición significó un cambio de giro en la teoría neodarwinista hasta entonces dominante. Nos referimos al ensayo publicado por Stephen Jay Gould y Richard Lewontin con el título "The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of Adaptationist Program" (*The Richness of Life. The Essential Stephen Jay Gould*). Gould, nacido en 1941, murió de mesotelioma en 2002, una forma rara de cáncer asociado a la exposición al amianto. Ningún paleontólogo, ningún teórico de la evolución ha mostrado tanta libertad de mente y eficacia creadora como ese neoyorquino que no dudaba en recurrir a la historia y al arte para explicar conceptos científicos. Escribió una veintena larga de libros, en su mayoría gavillas de los 300 ensayos aparecidos en la revista *Natural History*. A su opus magnum, *The Structure of Evolutionary Theory*, le consagró veinte años de su vida.

Había estudiado la carrera de geología en el Colegio Universitario Antioch de Ohio y recibió el doctorado en paleontología por la Universidad de Columbia en Nueva York en 1967. Desde 1982 hasta su muerte ocupó la cátedra Alexander Agassiz de zoología de la Universidad de Harvard, que compaginó con la dirección de la sección de paleontología de invertebrados del Museo de Zoología Comparada.

No recusó nunca la polémica. En 1975 E. O. Wilson dio a la imprenta su *Sociobiology*, cuya tesis central aplicada a los humanos sostenía que las desigualdades en salud, estatuto y poder entre géneros, clases sociales y razas, constituían propiedades que se habían ido adquiriendo en el curso de la evolución, resultado de procesos de selección darwinista y por tanto muy alejadas de las posibilidades de modificación o remedio. Ante semejante proclama, el grupo de Cambridge autodenominado "Ciencia para el pueblo", del que formaba parte Gould, publicó en 1977 una rotunda respuesta colectiva con el título *Biology as a Social Weapon*. Aunque la fase activista de Gould fue bastante breve, sus críticas contra el pensamiento racista y determinista conformaron buena parte de sus escritos posteriores, desde *The Mismeasure of Man* (1981) hasta los debates durante los años noventa con el zoólogo Richard Dawkins y el filósofo Daniel Dennett, tras la reconversión de la sociobiología en psicología evolutiva. Gould se enfrentó a Richard Dawkins, abogado de una selección natural centrada de forma exclusiva en los genes y donde la evolución se convierte en mero cambio de frecuencias génicas en la población; los fenotipos desaparecen. Gould sostenía, por el contrario, que la selección operaba en varios niveles, sobre genes y genomas, fenotipos, poblaciones y especies.

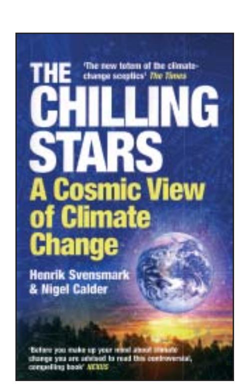
Se dedicó muy pronto a los trabajos de campo. Su tesis versó sobre la evolución de los gasterópodos de las Bermudas. Fue en el caracol *Poecilozonites* donde detectó el fenómeno de la estasis morfológica interrumpida por períodos de intenso cambio evolutivo. Descubierta esa misma pauta en *Phacops*, trilobites fósil de Devónico, la llamó con su alumno Niles Eldredge proceso evolutivo de "equilibrios puntuados". Frente a muchos de sus amigos y partidarios que sostenían que la especiación podría darse por transiciones abruptas, Darwin proclamaba que la naturaleza no daba saltos y se aferraba al cambio gradual. Las conchas de los caracoles dibujan una hélice y su superficie externa posee bandas características. ¿Qué es lo que determina sus colores y su forma? ¿Son efectos accidentales? ¿Son adaptativos; es decir, cumplen alguna función que incrementa el éxito reproductor del caracol que lo porta y por tanto se hallan sujetos a presión selectiva?

Los adaptacionistas afirman que las diferencias fenotípicas reflejan ventajas funcionales para el organismo. Sus

oponentes, siguiendo la tesis de Motoo Kimura, consideran diferencias neutras, creadas por el azar, sin suponer mejora ni recorte de eficacia biológica. El enfrentamiento entre ambas posturas quedó recogido en el artículo escrito en 1979 con Richard Lewontin “The Spandrels of San Marco”, mencionado. El texto se muestra sumamente crítico contra el pilar adaptacionista de la teoría sintética de la evolución. Apoyándose en una metáfora arquitectónica, los autores ponían de manifiesto que un carácter podía seguirse de otras propiedades sin necesidad de haber sido seleccionado por sí mismo. El título alude a la basílica de san Marcos de Venecia, cuyos domos reposan sobre cuatro arcos, una arquitectura que impone la formación de cuatro pendientes o superficies de forma triangular, rellenas con mosaicos artísticos por el decorador, pero sin haber entrado en los planos del arquitecto. La exigencia arquitectónica concierne a los arcos que portan las cargas. De manera pareja, muchos rasgos observables de los seres vivos son de relleno. A mayor abundamiento, Gould y Lewontin introducen el adjetivo “panglossiano”, en referencia al doctor Pangloss, personaje creado por Voltaire en *Candide* (para ridiculizar a Leibniz), quien no dejaba de repetir “Todo está hecho por lo mejor en el mejor de los mundos posibles”.

La evolución, decía Gould gráficamente, no es a la carta, sino que está estructuralmente condicionada; no todos los rasgos fenotípicos son adaptativos, sino que pueden tratarse de exaptaciones o incluso accidentes contingentes. En *The Structure of Evolutionary Theory*, publicada escasos meses antes de su muerte, repasa la historia de las ideas sobre la evolución y contrapone a la doctrina darwinista oficial los puntos necesitados de modificación: la evolución es jerárquica y opera no sólo sobre los genes, sino también sobre las especies; la selección natural no es el único motor de la evolución; las grandes perturbaciones repercuten en el destino de los grupos.

Luis Alonso



THE CHILLING STARS. A COSMIC VIEW OF CLIMATE CHANGE,
por Henrik Svensmark y Nigel Calder.
Icon Books Ltd.; Cambridge, 2007.

Cambio climático

Una explicación cósmica

¿Se imaginan que la emisión de CO_2 y otros gases de efecto invernadero no fuera el causante directo del calentamiento global y que la campaña de Al Gore sobre la responsabilidad de la actual civilización humana fuera una acción desmedida? Bueno, pues este libro ofrece argumentos científicos alternativos para explicar el aumento de la temperatura media del planeta Tierra.

La base del razonamiento reside en la acción de los rayos cósmicos, formados en las explosiones de supernovas galácticas, que penetran nuestra atmósfera y desempeñan una función decisiva en la formación de las nubes bajas en la Tierra, que son las que enfrían la superficie del planeta.

La idea es que a más rayos cósmicos mayor es la formación de nubes, con lo cual aumenta el albedo del planeta: aumenta la reflexión de la luz solar por las nubes y, por lo tanto, llega menos calor solar a la superficie. En consecuencia, disminuye la temperatura en superficie. En este momento, aduce el autor, la formación de nubes bajas es menor que a principios del siglo XX debido a la llegada de menos rayos cósmicos y, por tanto, la temperatura de la superficie de la Tierra es mayor. En todo ello, el Sol desempeña una función principal ya que, por un lado, el viento solar regula la cantidad de rayos cósmicos que penetra en el escudo magnético terrestre y, por otro, calienta la superficie terrestre.

La descripción de los trabajos científicos de varios investigadores, observaciones efectuadas, datos utilizados, modelos teóricos, experimentos realizados para comprobarlos y correlaciones entre diversos parámetros resulta muy interesante a lo largo del libro. Sin recurrir a formulaciones matemáticas, expone los argumentos y la historia de su gestación. No sin cierta precariedad, pese a todo, ya que el trabajo científico sobre el que se asientan los argumentos principales no sigue la actual “moda” entre científicos, y ahora políticos y sociedad en general, sobre la explicación del cambio climático. Por ello, la investigación “contracorriente” ha sido más difícil que en caso contrario.

En su haber, aparte de ofrecer una explicación plausible al calentamiento global terrestre, la aportación de interpretaciones interesantes sobre calentamientos y glaciaciones históricas habidas en el planeta en los pasados mil millones de años, es decir, a escala cósmica, cuando ni siquiera el hombre existía sobre el planeta. En esta historia, se ofrecen argumentos científicos que describen estos hechos relacionados con el deambular del Sol y su sistema planetario, y en consecuencia de la Tierra, por la galaxia en sus más de 20 vueltas alrededor de su centro. En tal análisis científico sobre datos y argumentos, la relación entre diferentes disciplinas (astronomía, climatología, geología, biología, química, física e historia) permite tejer una visión general más completa del cambio de temperatura terrestre a lo largo del tiempo.

En esa perspectiva, el debate sobre si es la explicación cósmica o el factor humano el responsable del calentamiento global pasa a un segundo término. Ciertamente ambos fenómenos contribuyen a él y, en el caso actual, habría que ver cuál de los dos es el más importante; cuantificar estos argumentos es lo más difícil y se impone continuar con todas las investigaciones que permitan comprender el fenómeno lo antes posible.

El libro cuenta con un prólogo de Eugene Parker, el físico solar que propuso la existencia del viento solar; el escepticismo con que se recibió su tesis sólo se superó con el lanzamiento, años más tarde, de los primeros satélites espaciales.

Teodoro Roca

EN EL PROXIMO NUMERO DE FEBRERO 2009



Conexión al cerebro,

por Gary Stix

¿Hasta dónde llegará la interfaz entre el cerebro y la máquina? ¿Podremos alguna vez conducir directamente a nuestro cerebro la última anotación de un blog e informaciones similares como si se tratara de un enorme lápiz de memoria?



¿Se puede curar el sida?

por Mario Stevenson

Para eliminar del organismo el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) debería inducírsele a salir de sus reservorios y evitar que volviera a ocuparlos.

La segunda ley,

por J. Miguel Rubí

Desafiando a la segunda ley de la termodinámica, la naturaleza muestra numerosos ejemplos de orden surgiendo del caos. Una nueva teoría resuelve esta aparente paradoja.





Identificación de galaxias remotas,

por Alberto Fernández Soto

Una galaxia lejanísima no es más que un vago punto de luz en las imágenes de una sección de cielo. ¿Cómo calcular a qué distancia se encuentra realmente?

Cenizas volcánicas del Silúrico,

por Derek E. G. Briggs, Derek J. Siveter, David J. Siveter y Mark D. Sutton

Un conjunto de fósiles en excepcional estado de conservación, aunque de difícil extracción, revela la biodiversidad de una comunidad marina de hace 425 millones de años.